

**UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE**  
**Faculté des sciences appliquées**  
**Département de génie civil**

**ENDOMMAGEMENTS DE RÉSIDENCES  
PAR LE GONFLEMENT DE REMBLAIS PYRITEUX ET  
ESSAI DE MESURE DU POTENTIEL RÉSIDUEL DE GONFLEMENT**

**Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées**  
**Spécialité : génie civil**

**Caroline Pépin**

**Sherbrooke (Québec), CANADA**

**Novembre 2000**



**National Library  
of Canada**

**Acquisitions and  
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada**

**Bibliothèque nationale  
du Canada**

**Acquisitions et  
services bibliographiques**

**395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada**

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

**The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.**

**The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.**

**L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.**

**L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.**

**0-612-67712-5**

**Canada**

## **Résumé**

**Le gonflement des remblais sous dalle de béton résidentielle est un phénomène d'actualité dans le domaine scientifique. Des sulfures de fer, comme la pyrite, contenus dans certaines roches s'oxydent pour produire de l'acide sulfurique. Cet acide sulfurique réagit avec la calcite pour former des sulfates comme le gypse. Ce minéral secondaire possède un volume plus grand que celui des minéraux originaux. Les cristaux nouvellement formés créent des pressions à l'intérieur de la roche et la font éclater lorsque celle-ci est de faible résistance mécanique comme le shale. Les cristaux peuvent également écarter des granulats dans un remblai. Les conditions environnementales propices à ce phénomène sont le gradient thermique, l'humidité, la teneur en oxygène ainsi que la nature et la population bactérienne. Les contraintes appliquées ainsi que la qualité du béton sont aussi des paramètres à considérer. Les conditions favorisant l'oxydation de la pyrite et l'expansion par le gonflement sont l'abondance, la texture et la distribution de la pyrite, la granulométrie, la compacité et les propriétés physico-mécaniques et l'épaisseur du remblai, la nature, l'abondance et la distribution des calcaires et des minéraux argileux.**

**Pour mieux comprendre ce phénomène, une étude comportant trois volets a été effectuée. Le premier volet consistait en un inventaire réalisé sur la Rive-Sud de Montréal dans les municipalités de Longueuil, Boucherville et Saint-Bruno-de-Montarville. Un total de 224 bâtiments résidentiels a été inspecté. L'inventaire comprend 224 relevés visuels au sous-sol et 197 relevés visuels au garage. Les maisons visitées avaient entre 6 et 57 ans. En général, les dommages sont souvent plus importants dans les garages que dans les sous-sols. Les symptômes les plus révélateurs de la présence de remblais pyriteux gonflants dans les sous-sols et les garages sont la présence de soulèvements et de fissures en étoile. Au garage, on retrouve en plus la fissuration et le déplacement latéral des murs de fondation.**

**Le deuxième volet consistait en un projet d'instrumentation. Cinq garages ont été sélectionnés. Ils présentent tous des dommages associés au problème de remblai gonflant. Un total de 12 fissuromètres a été installé dans les cinq garages. Deux types de fissuromètre ont été utilisés. Le premier fissuromètre est de type Fissuro-Logger. L'acquisition des mesures de déplacement et de température se faisait automatiquement toutes les deux heures. Le deuxième fissuromètre est de**

type Tell-Tale. Il s'agit d'un fissuromètre mécanique visuel. Les mesures étaient prises par les propriétaires toutes les semaines. En plus des fissuromètres, un thermomètre et un hygromètre ont été installés dans chaque garage. La température et l'humidité étaient notées à chaque semaine par les propriétaires. Les mesures d'instrumentation ont été prises pendant sept mois.

Les résultats ont permis d'affirmer que les réactions de gonflement sont toujours en cours dans les cinq remblais étudiés. Il est difficile de connaître le rythme de la progression du gonflement lorsqu'il y avait seulement des fissuromètres de type Tell-Tale installés, en raison de leur faible précision. Par contre, pour les trois remblais instrumentés à l'aide d'un fissuromètre de type Fissuro-Logger, le rythme de la progression du mouvement enregistré a pu être déterminé. Le remblai ayant montré le rythme le plus rapide a fait soulever la dalle de 7,2 mm en sept mois. Puisque la prise de mesure se faisait près d'une fissure et d'un joint dalle-mur, une partie de ce soulèvement peut être attribuable au basculement de la dalle. La température a un effet plus ou moins prononcé sur la mesure des mouvements structuraux tout dépendant si le fissuromètre était installé sur la dalle de béton ou sur le mur de fondation.

Le troisième volet consistait à tenter de mesurer le potentiel de gonflement résiduel de trois des cinq remblais instrumentés selon le protocole en chambre humide sur le granulat mes de l'avant par les chercheurs de l'Université de Sherbrooke. Une analyse granulométrique, une analyse pétrographique, des analyses chimiques et l'étude de lames minces ont été réalisées pour chacun des trois matériaux granulaires échantillonnés. Les trois matériaux granulaires échantillonnés représentent un potentiel de gonflement élevé. Deux garages sur trois présentent des dommages d'ordre esthétique c'est-à-dire des dommages qui peuvent altérer la jouissance de l'espace viable. Le troisième garage présente en plus des dommages d'ordre structural. Le montage expérimental utilisé pour effectuer l'essai de gonflement résiduel a été créé par le Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée (LRMGA) de l'Université de Sherbrooke. Les trois moules ont été placés dans un environnement à température (38°C) et humidité (100%) contrôlées pendant trois mois. Les déplacements enregistrés sont de 0,111%, 0,060% et de 0,039%. Un des trois Fissuro-Logger installés dans les garages mesurait aussi le gonflement. Les déplacements engendrés par ce granulat sur le terrain et en laboratoire ont été comparés et concordent.



## **Remerciements**

Plusieurs personnes m'ont aidé dans l'accomplissement de ce travail. Je veux donc leur manifester ma reconnaissance.

Je voudrais premièrement remercier le Dr. Gérard Ballivy, professeur titulaire au département de génie civil de l'Université de Sherbrooke et directeur de mon projet de recherche, pour m'avoir permis de faire une maîtrise au sein de son équipe de recherche. Il m'a laissé beaucoup de liberté, d'initiative et d'autonomie dans l'exécution de mes travaux.

Je tiens aussi à remercier le Dr. Marc G. Tanguay, professeur titulaire à l'École Polytechnique, avec qui j'ai eu la chance d'avoir de longues discussions très enrichissantes. Il m'a permis d'orienter certaines parties de mon travail et de toujours garder mes objectifs en tête.

Je remercie également le Dr. Achour Bellaloui pour m'avoir initiée à la pensée qui entoure la recherche scientifique.

J'exprime également ma reconnaissance à Patrice Rivard qui a su me diriger adroitement dans tout le dédale des procédures de la maîtrise. Il a aussi été un bon conseiller lors du déroulement de mes projets de recherche. J'ai beaucoup apprécié son amitié, sa bonne humeur et sa joie de vivre.

Je remercie pareillement Alexandre Dion, Stéphane Savary et Nicolas Tanguay pour leur disponibilité et leur aide lors de la campagne d'investigation ainsi que François Côté qui nous a supervisé dans nos débuts.

Je suis aussi très reconnaissante envers tous les propriétaires qui ont bien voulu participer à l'étude ainsi qu'à ceux qui ont eu la gentillesse de bien vouloir prendre les mesures d'instrumentation à leur domicile pendant plusieurs mois.

Je voudrais aussi remercier Nicole Laverdière, Danick Charbonneau, Georges Lalonde et Martin Lizotte, personnel au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, pour leur collaboration et leur soutien.

Je suis aussi reconnaissante envers Jean Beaulieu, professeur et pétrographe à l'École Polytechnique qui a su me seconder avec ses yeux d'expert lors de l'examen de lames minces.

Je remercie de même Yvon Latreille, ingénieur à Labo S.M inc., avec qui j'ai eu la chance d'avoir des entretiens très intéressants.

Finalement, je tiens à remercier Charles Tanguay, président de l'Association des Consommateurs pour la Qualité dans la construction (ACQC) sans qui l'approche de propriétaires lors de la campagne d'investigation aurait été très difficile.

**Ce projet de recherche a été rendu possible grâce à la subvention de la SCHL. Merci à Mme Jacqueline Meunier d’avoir épaulé cette étude.**

# Table des matières

	page
<b>1 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVUE DES CONNAISSANCES .....</b>	<b>5</b>
2.1 Problématique reliée aux remblais de shale pyriteux .....	5
2.2 Géologie.....	5
2.3 Réactions chimiques et phénomène de gonflement.....	7
2.4 Phénomène de sulfatation .....	11
2.5 Dommages .....	12
2.6 Remédiations .....	14
2.7 Réglementation sur la construction.....	15
2.8 Travaux de recherche antérieurs.....	17
<b>3 INVESTIGATION DE CAS RÉSIDENTIELS .....</b>	<b>19</b>
3.1 Procédure .....	19
3.2 Méthodologie d'enquête .....	20
3.2.1 Fiche : Identification de la propriété .....	20
3.2.2 Fiche : Relevé des désordres au sous-sol .....	22
3.2.3 Fiche : Relevé des désordres au garage .....	28
3.2.4 Fiche : Croquis des désordres (sous-sol et garage) .....	32
3.3 Méthodologie de classement des données .....	34
<b>4 RÉSULTATS .....</b>	<b>37</b>
4.1 Bâtiments résidentiels visités: généralités .....	37
4.1.1 Âge et valeur des résidences .....	37
4.1.2 Durée de possession des maisons .....	39
4.1.3 Types de revêtement des dalles de béton .....	40
4.2 Classement des cas.....	41
4.2.1 Attribution des niveaux de confiance .....	41
4.2.2 Détermination des types de problèmes .....	43
<b>5 ANALYSE DES DONNÉES ET INTERPRÉTATION .....</b>	<b>47</b>
5.1 Principaux symptômes.....	47
5.1.1 Soulèvements ponctuels .....	47
5.1.2 Types de fissures .....	49
5.1.3 Ouverture des fissures .....	51
5.1.4 Poudre blanchâtre .....	53
5.1.5 Fissures des murs de fondation .....	54
5.2 Observations spécifiques aux garages .....	57
5.2.1 État des façades des garages .....	57
5.2.2 Briques lézardées au garage (mur extérieur) .....	59
5.2.3 Utilisation du garage .....	60
5.2.4 Température du garage pendant l'hiver .....	61
5.2.5 Localisation de la fissuration .....	62
5.2.6 Position des gouttières autour du garage .....	63
5.2.7 Événements déclencheurs du gonflement du remblai .....	64

5.3	Observations spécifiques aux sous-sols.....	65
5.3.1	État des cloisons et des portes du sous-sol .....	65
5.3.2	Domage à l'étage au-dessus du sous-sol .....	66
5.3.3	Position des gouttières autour du sous-sol.....	67
5.3.4	Événements déclencheurs du gonflement du remblai .....	67
5.3.5	Dénivelé du terrain autour de la maison .....	68
5.4	Fiabilité des relevés visuels .....	69
5.5	Discussion .....	70
<b>6</b>	<b>RÉSULTATS DES SITES INSTRUMENTÉS .....</b>	<b>75</b>
6.1	Types d'instruments.....	75
6.1.1	Fissuromètre de type Fissuro-Logger .....	75
6.1.2	Fissuromètre de type Tell-Tale.....	76
6.1.3	Thermomètre et hygromètre .....	78
6.1.4	Répartition et positionnement des instruments.....	78
6.2	Étude de cas St-Bruno #1 .....	79
6.3	Étude de cas St-Bruno #2.....	84
6.4	Étude de cas LaPrairie #1 .....	88
6.5	Étude de cas LaPrairie #2 .....	94
6.6	Étude de cas Boucherville.....	99
6.7	Validation des résultats de température.....	106
6.8	Discussions .....	109
<b>7</b>	<b>TENTATIVE DE MESURE DU POTENTIEL DE GONFLEMENT RÉSIDUEL DE TROIS (3) SITES INSTRUMENTÉS .....</b>	<b>111</b>
7.1	Caractérisation des matériaux granulaires.....	111
7.1.1	Échantillonnage.....	111
7.1.2	Étude du béton.....	112
7.1.3	Analyses granulométriques des granulats du remblai .....	116
7.1.4	Analyses pétrographiques des granulats du remblai .....	120
7.1.5	Analyses chimiques des granulats du remblai .....	124
7.1.6	Lames minces .....	125
7.2	Essai de gonflement résiduel .....	127
7.2.1	Montage expérimental .....	128
7.2.2	Mesure du gonflements résiduels .....	129
7.3	Synthèse des trois cas.....	131
7.3.1	Synthèse des résultats de caractérisation de LaPrairie#1 .....	131
7.3.2	Synthèse des résultats de caractérisation de LaPrairie#2 .....	132
7.3.3	Synthèse des résultats de caractérisation de Boucherville .....	133
7.3.4	Discussion .....	134
	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>135</b>
	<b>RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>139</b>
	<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>141</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE .....</b>	<b>145</b>
	<b>Annexe 1 : Fiche technique des fissuromètres .....</b>	<b>149</b>
	<b>Annexe 2 : Protocole de recherche sur bâtiments résidentiels existants (version 2000) .....</b>	<b>155</b>

## Liste des figures

	page
Figure 1.1 Organigramme du projet de recherche.....	3
Figure 2.1 Shale argileux pyriteux avec cristaux de gypse .....	5
Figure 2.2 Sulfatation d'une dalle de béton .....	11
Figure 3.1 Fissure en étoile .....	24
Figure 3.2 Mesure de l'ouverture d'une fissure .....	24
Figure 3.3 Cristaux blanchâtres (efflorescence) .....	25
Figure 3.4 Mesure du soulèvement.....	25
Figure 3.5 Béton remis au niveau .....	27
Figure 3.6 Fissure au coin d'une fondation.....	27
Figure 3.7 Fissure entre les coins .....	27
Figure 3.8 Fissure colmatée (mur extérieur) .....	27
Figure 3.9 Fissure en coin (garage en réparation).....	31
Figure 3.10 Croquis des désordres (sous-sol et garage) (adaptation du protocole CTQ-M200)..	33
Figure 4.1 Distribution de l'âge des bâtiments résidentiels.....	38
Figure 4.2 Distribution des évaluations des maisons étudiées (1996-1997) .....	38
Figure 4.3 Distribution de la durée de possession des bâtiments résidentiels par le propriétaire actuel, d'après les propriétaires actuels.....	40
Figure 5.1 Distribution des soulèvements mesurés dans les garages .....	48
Figure 5.2 Distribution des soulèvements mesurés dans les sous-sols.....	48
Figure 5.3 Pourcentage de surface visible au sous-sol.....	51
Figure 5.4 Distribution du nombre de briques lézardées au garage .....	59
Figure 5.5 Température des garages pendant l'hiver .....	61
Figure 6.1 Fissuro-Logger .....	75
Figure 6.2 Tell-Tale standard .....	77
Figure 6.3 Tell-Tale de coin .....	77
Figure 6.4 Tell-Tale de surface.....	77
Figure 6.5 Tell-Tale de déplacement.....	77
Figure 6.6 Cartographie des fissures et positionnement des instruments de St-Bruno #1 .....	80
Figure 6.7 Tell-Tale standard intérieur.....	81
Figure 6.8 Tell-Tale de déplacement.....	81
Figure 6.9 St-Bruno #1 – Tell-Tale standard – Mesure de l'ouverture de la fissure.....	82
Figure 6.10 St-Bruno #1 – Tell-Tale de déplacement – Mesure les mouvements de la fondation du garage .....	82
Figure 6.11 Cartographie des fissures et positionnement des instruments de St-Bruno #2 .....	85
Figure 6.12 Tell-Tale standard intérieur.....	86
Figure 6.13 Tell-Tale extérieur.....	86
Figure 6.14 St-Bruno #2 – Tell-Tale standard – Mesure l'ouverture de la fissure près du mur intérieur .....	87
Figure 6.15 St-Bruno #2 – Tell-Tale standard – Mesure l'ouverture de la fissure près du mur extérieur .....	87
Figure 6.16 Cartographie des fissures et positionnement des instruments de LaPrairie #1 .....	90
Figure 6.17 Positionnement du Fissuro-Logger et du Tell-Tale standard de LaPrairie #1 .....	91

Figure 6.18	LaPrairie #1 – Tell-Tale standard – Mesure l’ouverture de la fissure.....	92
Figure 6.19	LaPrairie #1 – Fissuro-Logger – Mesure du soulèvement de la dalle.....	92
Figure 6.20	Cartographie des fissures et positionnement des instruments de LaPrairie #2.....	95
Figure 6.21	Positionnement du Fissuro-Logger et du Tell-Tale de déplacement de LaPrairie #296	
Figure 6.22	LaPrairie #2 – Tell-Tale de déplacement – Mesure le soulèvement de la dalle.....	97
Figure 6.23	LaPrairie #2 – Fissuro-Logger – Mesure de l’ouverture de la fissure.....	97
Figure 6.24	Cartographie des fissures et positionnement des instruments de Boucherville.....	100
Figure 6.25	Positionnement du Fissuro-Logger de Boucherville.....	101
Figure 6.26	Tell-Tale standard .....	101
Figure 6.27	Tell-Tale de coin .....	101
Figure 6.28	Tell-Tale de surface.....	101
Figure 6.29	Boucherville - Tell-Tale de surface - Mesure le soulèvement de la dalle.....	103
Figure 6.30	Boucherville – Tell-Tale standard – Mesure l’ouverture de la fissure.....	103
Figure 6.31	Boucherville – Tell-Tale de coin – Mesure le mouvement de la fondation.....	104
Figure 6.32	Boucherville – Fissuro-Logger – Mesure du déplacement du mur de fondation..	104
Figure 6.33	Comparaison des températures visuelles et automatiques de LaPrairie #1.....	107
Figure 6.34	Comparaison des températures visuelles et automatiques de LaPrairie #2.....	107
Figure 6.35	Comparaison des températures visuelles et automatiques de Boucherville.....	108
Figure 7.1	Carotte de béton de LaPrairie #1.....	113
Figure 7.2	Carotte de béton de LaPrairie #2.....	113
Figure 7.3	Carotte de béton de Boucherville.....	113
Figure 7.4	Courbe granulométrique cumulative de LaPrairie#1 .....	117
Figure 7.5	Courbe granulométrique cumulative de LaPrairie#2.....	118
Figure 7.6	Courbe granulométrique cumulative de Boucherville .....	119
Figure 7.7	Montage expérimental de gonflement en laboratoire.....	128
Figure 7.8	Essai de gonflement résiduel en chambre humide (lecture visuelle).....	129

## Liste des tableaux

	page
<b>TABEAU 3.1 IDENTIFICATION DE LA PROPRIÉTÉ (ADAPTATION DU PROTOCOLE CTQ-M200) ....</b>	<b>21</b>
<b>TABEAU 3.2 RELEVÉ DES DÉSORDRES AU SOUS-SOL (ADAPTATION DU PROTOCOLE CTQ-M200)23</b>	<b>23</b>
<b>TABEAU 3.3 RELEVÉ DES DÉSORDRES AU GARAGE (ADAPTATION DU PROTOCOLE CTQ-M200) 29</b>	<b>29</b>
<b>TABEAU 3.4 NIVEAU DE CONFIANCE (C.PÉPIN 1999) (LA PYRITE ÉTANT RESPONSABLE DES DOMMAGES OBSERVÉS).....</b>	<b>35</b>
<b>TABEAU 4.1 RÉPARTITION DES RELEVÉS VISUELS .....</b>	<b>37</b>
<b>TABEAU 4.2 TYPES DE REVÊTEMENT DES DALLES DE BÉTON AU SOUS-SOL ET AU GARAGE .....</b>	<b>41</b>
<b>TABEAU 4.3 CLASSEMENT DES SOUS-SOLS SELON LEUR NIVEAU DE CONFIANCE D’AVOIR UN PROBLÈME ASSOCIÉ À UN REMBLAI PYRITEUX.....</b>	<b>42</b>
<b>TABEAU 4.4 CLASSEMENT DES GARAGES SELON LEUR NIVEAU DE CONFIANCE D’AVOIR UN PROBLÈME ASSOCIÉ À UN REMBLAI PYRITEUX.....</b>	<b>42</b>
<b>TABEAU 4.5 NOMBRE DE MAISONS AYANT OU NON DES PROBLÈMES DANS LES DEUX PIÈCES ....</b>	<b>43</b>
<b>TABEAU 4.6 DISTRIBUTION DES TYPES DE PROBLÈMES DANS LES GARAGES.....</b>	<b>44</b>
<b>TABEAU 4.7 DISTRIBUTION DES TYPE DE PROBLÈMES DANS LES SOUS-SOLS.....</b>	<b>44</b>
<b>TABEAU 5.1 TYPES DE FISSURES AU GARAGE .....</b>	<b>49</b>
<b>TABEAU 5.2 TYPES DE FISSURES AU SOUS-SOL .....</b>	<b>50</b>
<b>TABEAU 5.3 OUVERTURE ET COLMATAGE DES FISSURES AU GARAGE.....</b>	<b>52</b>
<b>TABEAU 5.4 OUVERTURE ET COLMATAGE DES FISSURES AU SOUS-SOL .....</b>	<b>52</b>
<b>TABEAU 5.5 QUANTITÉ DE POUDRE BLANCHÂTRE AUX FISSURES ET AUX JOINTS DU GARAGE ...</b>	<b>53</b>
<b>TABEAU 5.6 QUANTITÉ DE POUDRE BLANCHÂTRE AUX FISSURES ET AUX JOINTS DU SOUS-SOL. 53</b>	<b>53</b>
<b>TABEAU 5.7 NOMBRE DE CAS DE FISSURES DANS LES MURS DE FONDATION DU GARAGE.....</b>	<b>54</b>
<b>TABEAU 5.8 IDENTIFICATION DU MUR DE FONDATION AFFECTÉ PAR LA FISSURATION AU GARAGE.. .....</b>	<b>55</b>
<b>TABEAU 5.9 DÉPLACEMENT LATÉRAL AU NIVEAU DES FISSURES DES MURS DE FONDATION AU GARAGE .....</b>	<b>56</b>
<b>TABEAU 5.10 FAÇADE DES GARAGES SIMPLES.....</b>	<b>58</b>
<b>TABEAU 5.11 FAÇADE DES GARAGES DOUBLES .....</b>	<b>58</b>
<b>TABEAU 5.12 FRÉQUENCE DE LAVAGE DE LA VOITURE DANS LE GARAGE .....</b>	<b>60</b>
<b>TABEAU 5.13 LOCALISATION DE LA FISSURATION SUR LA DALLE DU GARAGE .....</b>	<b>62</b>
<b>TABEAU 5.14 GOUTTIÈRES AUTOUR DU GARAGE.....</b>	<b>63</b>
<b>TABEAU 5.15 ÉVÉNEMENTS DÉCLENCHEURS DES DOMMAGES AU GARAGE .....</b>	<b>64</b>
<b>TABEAU 5.16 ÉTAT DES CLOISONS ET DES PORTES DU SOUS-SOL.....</b>	<b>66</b>
<b>TABEAU 5.17 GOUTTIÈRES AUTOUR DU SOUS-SOL .....</b>	<b>67</b>
<b>TABEAU 5.18 ÉVÉNEMENTS DÉCLENCHEURS DES DOMMAGES AU SOUS-SOL .....</b>	<b>68</b>
<b>TABEAU 5.19 DÉVIVELÉ DU TERRAIN AUTOUR DE LA MAISON.....</b>	<b>69</b>
<b>TABEAU 6.1 INVENTAIRE DES FISSUROMÈTRES .....</b>	<b>78</b>
<b>TABEAU 6.2 DESCRIPTION DES DOMMAGES DE ST-BRUNO #1 .....</b>	<b>79</b>
<b>TABEAU 6.3 DESCRIPTION DES DOMMAGES DE ST-BRUNO #2 .....</b>	<b>84</b>
<b>TABEAU 6.4 DESCRIPTION DES DOMMAGES DE LAPRAIRIE #1.....</b>	<b>89</b>
<b>TABEAU 6.5 DESCRIPTION DES DOMMAGES DE LAPRAIRIE #2.....</b>	<b>94</b>
<b>TABEAU 6.6 DESCRIPTION DES DOMMAGES DE BOUCHERVILLE .....</b>	<b>99</b>
<b>TABEAU 7.1 EXAMEN VISUEL DES ÉCHANTILLONS DE BÉTON.....</b>	<b>112</b>
<b>TABEAU 7.2 CARACTÉRISTIQUES DES ÉCHANTILLONS DE BÉTON POUR L’ESSAI SONIQUE.....</b>	<b>114</b>

TABLEAU 7.3	VITESSES ET CARACTÉRISTIQUES DYNAMIQUES DES ÉCHANTILLONS DE BÉTON ...	115
TABLEAU 7.4	CLASSIFICATION DE LA QUALITÉ DU BÉTON SELON L'ESSAI SONIQUE.....	115
TABLEAU 7.5	ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DE L'ÉCHANTILLON LAPRAIRIE#1 .....	117
TABLEAU 7.6	ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DE L'ÉCHANTILLON LAPRAIRIE#2 .....	118
TABLEAU 7.7	ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DE L'ÉCHANTILLON BOUCHERVILLE.....	119
TABLEAU 7.8	MASSES MINIMALE DES PRISES D'ESSAIS.....	120
TABLEAU 7.9	NP ET IPPG DE CHAQUE ÉCHANTILLON .....	121
TABLEAU 7.10	EXAMEN PÉTROGRAPHIQUE VISUEL DE L'ÉCHANTILLON LAPRAIRIE #1 .....	121
TABLEAU 7.11	CALCUL DU NP ET DE L'IPPG DE LAPRAIRIE#1.....	121
TABLEAU 7.12	EXAMEN PÉTROGRAPHIQUE VISUEL DE L'ÉCHANTILLON LAPRAIRIE#2.....	122
TABLEAU 7.13	CALCUL DU NP.ET DE L'IPPG DE LAPRAIRIE#2.....	122
TABLEAU 7.14	EXAMEN PÉTROGRAPHIQUE VISUEL DE L'ÉCHANTILLON BOUCHERVILLE.....	123
TABLEAU 7.15	CALCUL DU NP ET DE L'IPPG DE BOUCHERVILLE .....	123
TABLEAU 7.16	ANALYSES CHIMIQUES DES ÉCHANTILLONS DE REMBLAIS DES GARAGES.....	124
TABLEAU 7.17	CALCUL DE LA QUANTITÉ DE CERTAINS MINÉRAUX DANS LES ÉCHANTILLONS DE REMBLAI .....	124
TABLEAU 7.18	LAME MINCE LAPRAIRIE#1-A, MUDSTONE À SILTSTONE.....	125
TABLEAU 7.19	LAME MINCE LAPRAIRIE#1-B, SILTSTONE CALCAREUX OU DOLOMITIQUE OU GRÈS TRÈS FIN .....	126
TABLEAU 7.20	LAME MINCE LAPRAIRIE#2-A, SHALE.....	126
TABLEAU 7.21	LAME MINCE LAPRAIRIE#2-B, DIORITE.....	127
TABLEAU 7.22	LAME MINCE BOUCHERVILLE, SYÉNITE.....	127
TABLEAU 7.23	PARAMÈTRES DES MONTAGES.....	129
TABLEAU 7.24	TAUX DE GONFLEMENT DES REMBLAIS EN CHAMBRE HUMIDE.....	130



# 1 INTRODUCTION

Au Québec, les dommages structuraux des bâtiments résidentiels causés par la présence de remblais pyriteux sous les dalles de béton sont connus de l'ensemble de la communauté scientifique depuis quelques années seulement. La sensibilisation du public face à ce problème s'est faite récemment à travers la télévision et les journaux. L'AEG (*Association of Engineering Geologists*), section de Montréal, a fait état des connaissances sur les shales pyriteux et les problèmes de gonflement au cours de trois colloques tenus dans la région de Montréal [AEG 1997, AEG 1998]. Suite au premier colloque, le Comité Technique Québécois d'étude des problèmes de gonflement associé à la pyrite (CTQ) est créé, regroupant des spécialistes et des intervenants des milieux concernés par le problème. Le CTQ a plusieurs mandats dont celui de réaliser une campagne d'investigation de cas résidentiels sur la Rive-Sud de Montréal ainsi que l'instrumentation du mouvement des fissures de quelques sites pour étudier l'évolution des mouvements et définir le potentiel de gonflement résiduel. Ce mémoire de maîtrise se veut une première partie de la réalisation de ces mandats. Ces études ont été rendues possible grâce à la subvention de la Société Canadienne d'Hypothèques et de Logement (SCHL) en collaboration avec la Société d'Habitation du Québec (SHQ) et avec l'aide de l'Association des Consommateurs pour la Qualité dans la Construction (ACQC).

À ce jour, aucune compilation portant sur les dommages de bâtiments résidentiels causés par la présence de remblais pyriteux n'avait été réalisée. Plusieurs bâtiments gouvernementaux, commerciaux et industriels ont déjà fait l'objet d'études particulières ou de rapports d'expertise. Par contre, les bâtiments résidentiels, qui constituent la grande majorité des bâtiments affectés par ce problème, ont été un peu laissés pour compte. Une revue des connaissances et des phénomènes en cause est présentée au chapitre 2.

L'inventaire des maisons atteintes de dommages causés par des remblais gonflants a été réalisé dans trois municipalités de la Rive-Sud de Montréal : Longueuil, Boucherville et Saint-Bruno-de-Montarville. Elles ont été choisies pour des raisons géologiques, leur proximité et diversité topographique, parmi une quinzaine de villes reconnues pour avoir un grand nombre de maisons affectées par des problèmes associés aux remblais pyriteux. Cette opération consistait à effectuer

un relevé des dommages observables afin d'en comprendre mieux la dynamique et d'analyser la variabilité des manifestations. L'inventaire a aussi servi à choisir cinq bâtiments résidentiels types afin de réaliser le projet d'instrumentation. Les maisons choisies présentent toutes un problème de remblai gonflant au garage. Les fissuromètres sont les instruments choisis. Ils permettent de mesurer, dans le temps, les mouvements des bordures des fissures l'une par rapport à l'autre, les soulèvements de la dalle de béton ainsi que les déplacements des murs de fondation.

Cet inventaire devrait permettre d'avoir une vue d'ensemble du problème sur la Rive-Sud de Montréal et une meilleure idée de l'ampleur des dommages. L'étude devrait aussi permettre de connaître les symptômes caractéristiques à la présence de remblais pyriteux sous les dalles de béton, de catégoriser les différents cas observés et d'observer les divers types de dommage possibles. Cette avenue devrait aussi permettre de solutionner des cas douteux où plusieurs mécanismes peuvent être en cause, soit l'action sulfatique ou des mécanismes de retrait ainsi que des problèmes d'ordre géotechnique (ex. tassement des sols).

Le remblai gonflant de certains sites instrumentés a aussi été échantillonné pour caractériser le granulat et évaluer le potentiel de gonflement résiduel. La méthode de caractérisation du remblai consiste à effectuer une analyse granulométrique, une analyse pétrographique afin de déterminer le nombre pétrographique (NP) et l'indice pétrographique du potentiel de gonflement (IPPG) et faire des analyses chimiques. L'étude pétrographique de lames minces est aussi réalisée pour étudier la minéralogie de la roche. La méthode d'évaluation du potentiel de gonflement résiduel utilisée est celle élaborée au Laboratoire de Mécanique des Roches et de Géologie Appliquée (LMRGA) de l'Université de Sherbrooke.

La figure 1.1 illustre le déroulement du projet de recherche sous forme d'organigramme.

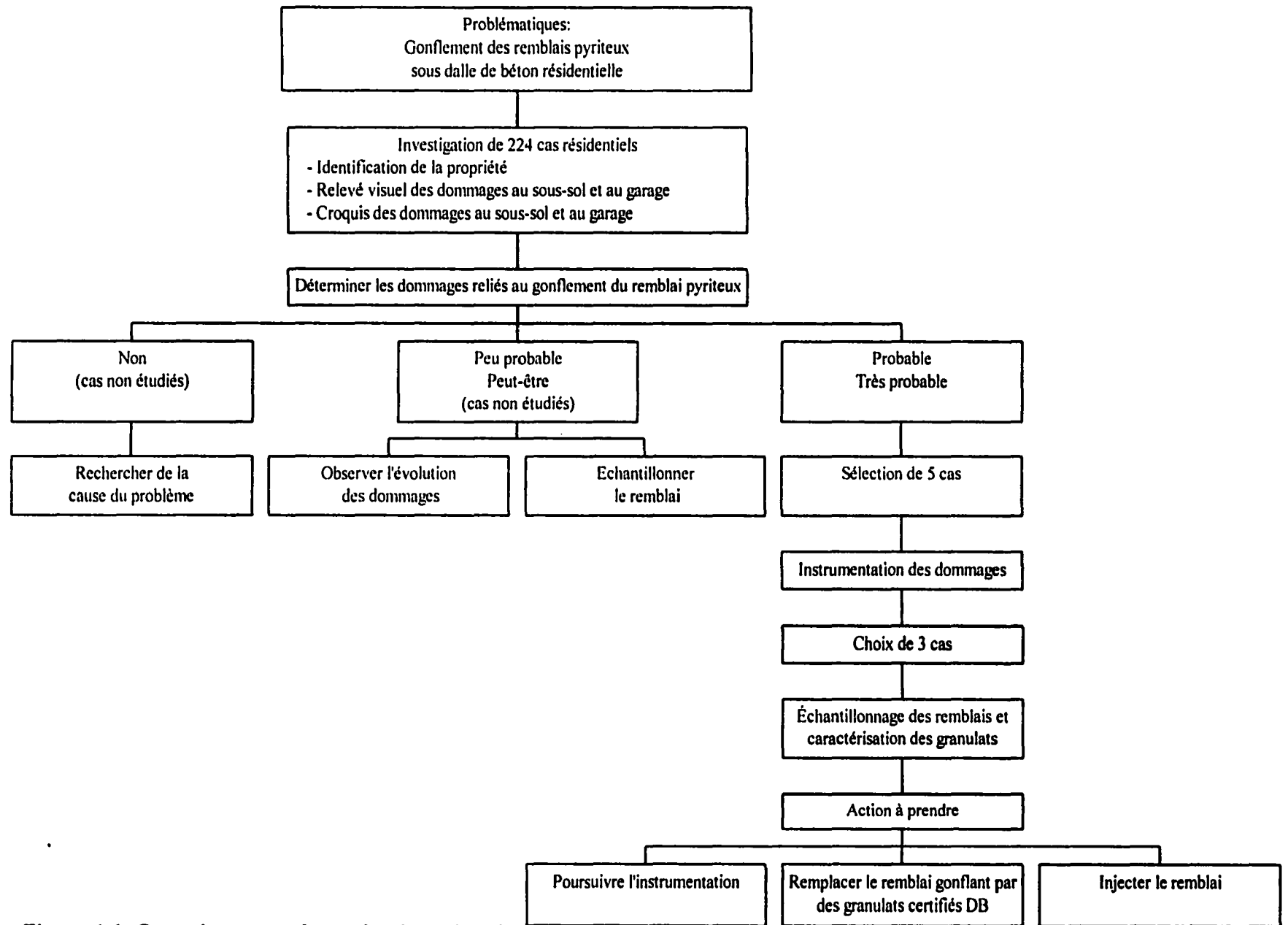


Figure 1.1 Organigramme du projet de recherche



## **2 REVUE DES CONNAISSANCES**

La revue des connaissances fait état des phénomènes en cause, des dommages qui leurs sont associés ainsi que des remédiations possibles.

### **2.1 Problématique reliée aux remblais de shale pyriteux**

Ces dernières années, de nombreux cas de dommages structuraux de bâtiments ont été associés aux soulèvements de dalles de béton sur sol. Des travaux et études effectués sur ces infrastructures ont démontré que le gonflement de la fondation granulaire constituée de shale argileux pyriteux était la cause principale du problème. Sur la Rive-Sud de Montréal, la communauté scientifique a commencée à prendre conscience de l'ampleur du problème au niveau résidentiel au milieu de l'année 1998 seulement [BÉRUBÉ 1997, TANGUAY 1998]. Des milliers de maisons seraient touchées par des problèmes de gonflement [BALLIVY et coll., 1999].

Il existe trois situations problématiques qui peuvent être reliées à la présence de pyrite [TANGUAY, 1998]. Premièrement, il y a le gonflement des remblais de pierre concassée pyriteuse qui sont compactés sous les dalles de béton. L'oxydation de la pyrite et des autres sulfures contenus dans la pierre engendre la formation de gypse et crée des forces d'expansion. Ceci entraîne le soulèvement et la fissuration de la dalle de béton [CÔTÉ, 1990]. Deuxièmement, il y a le roc gonflant situé sous les dalles de béton. Comme dans le cas du remblai, il y a la formation de gypse (et d'autres minéraux gonflants), la création de forces d'expansion ainsi que le soulèvement et la fissuration de la dalle de béton [QUIGLEY 1970, BÉRUBÉ et al., 1986]. Troisièmement, il y a la sulfatation du béton qui peut se produire dans les deux situations problématiques citées précédemment. Il s'agit de pourriture chimique du béton accompagnée de gonflement et de dépôts de minéraux secondaires [BÉRUBÉ 1997, CÔTÉ 1990].

### **2.2 Géologie**

La pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) est la forme de sulfure de fer que l'on retrouve à l'état naturel la plus fréquente dans les roches. Elle serait obtenue qu'en présence d'hydrogène sulfuré et de soufre [DIVET,

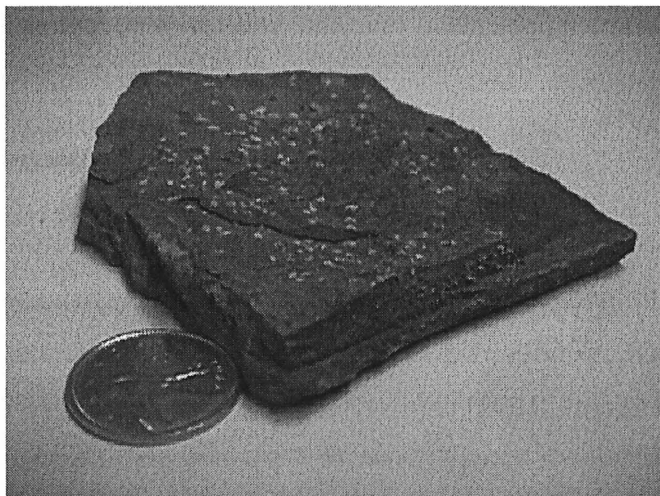
1996]. On la rencontre dans des roches de toutes natures et de tous âges géologiques, mais surtout dans les roches métamorphiques (schiste) et sédimentaires (shale) [PENNER et coll. 1975]. La pyrite représente plus de 95% des sulfures présents dans les roches sédimentaires. Dans les roches sédimentaires, la pyrite peut apparaître sous plusieurs formes distinctes :

- Amas polymorphes dans la masse rocheuse ;
- En remplacement de formes fossilisées dont, en certains cas, la forme est framboïdale ;
- En grains individuels ou regroupés prenant des formes cristallines plus ou moins fines et variant de géométrie ;
- Lorsque la cristallisation peut avoir le temps de bien se faire, la forme peut alors prendre des formes cubiques.

La pyrite apparaît fréquemment sous forme de très fins cristaux de grandeurs allant de 5 à 20  $\mu\text{m}$  donc invisible à l'œil nu [GRATTAN-BELLEW et coll., 1982].

La variété allotropique de la pyrite qui se présente sous forme framboïdale montre une particularité dans sa structure cristallographique de paires de soufre ( $\text{S}_2^{2-}$ ). La pyrite framboïdale est donc une espèce labile, par conséquent plus réactive que les sulfures  $\text{S}^{2-}$ . [BELLALLOUI et coll., 1999]

Compte tenu des conditions nécessaires à la formation de la pyrite sédimentaire, ce minéral se rencontre essentiellement dans les sédiments fins tels les argiles ou les vases. De plus, la présence indispensable de sulfates localise la réaction principalement au sein des estuaires, soit dans un environnement marin stagnant [DIVET, 1996]. Il faut par contre noter que le volcanisme en a aussi déposé dans les grands bassins sédimentaires. Au Québec, la pyrite est associée au shale noir argileux pyriteux ou au schiste argileux (voir figure 2.1). La pyrite est généralement trop fine dans un shale pour être détectée à l'œil nu. Il faut donc un examen microscopique de la pierre en section polie pour l'observer [BÉRUBÉ, 1997].



**Figure 2.1 Shale argileux pyriteux avec cristaux de gypse**

Suivant la classification des shales [BLATT et al., 1980] en fonction du diamètre moyen des grains, on reconnaît des claystones, des mudstones, jusqu'à des siltstones. Les pourcentages variables en silt et argiles, constituants principaux de cette roche, permettent deux classifications majeures : *silty mudshale* (boue > 50%) ou *muddy siltshale* (silt > 50%). Ces roches argileuses contiennent toujours des proportions variables de matières organiques [CÔTÉ 1990].

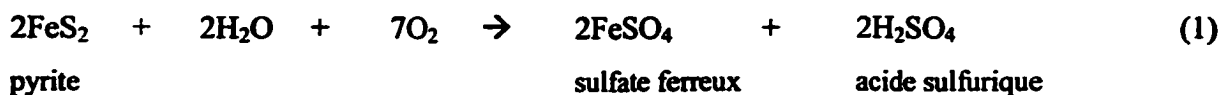
De façon générale, les shales se retrouvent, au Québec, principalement dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, c'est-à-dire sur les deux rives du Saint-Laurent allant d'Ottawa à Québec, et présentent une épaisseur variant de 1500 à 3000 mètres. La partie supérieure des Basses-Terres du Saint-Laurent, c'est-à-dire les groupes de Trenton, d'Utica et de Lorraine (dans la région de Montréal), présente toutefois de plus forts pourcentages en shales. On retrouve également des shales dans les Appalaches c'est-à-dire de l'Estrie jusqu'en Gaspésie [BLANCHETTE, 1997].

### **2.3 Réactions chimiques et phénomène de gonflement**

Les réactions conduisant à des soulèvements de dalle s'énoncent en deux étapes principales [CÔTÉ 1990, BÉRARD 1997, BÉRUBÉ 1997]:

- L'oxydation de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ );
- La cristallisation du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

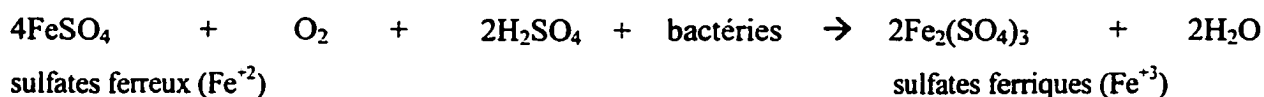
L'oxydation de la pyrite en présence d'humidité et d'oxygène atmosphérique s'écrit comme suit :



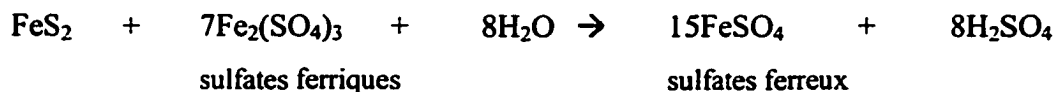
Pour diverses raisons, le mécanisme par lequel les atomes des sulfures sont libérés se doit d'être de nature électrochimique, ce qui implique la corrosion du cristal avant la dissociation des ses constituants [CLARK, 1966]. Les sulfures localisés à l'intérieur des granulats sont moins affectés [BALLIVY et coll., 1999] car ils sont moins en contact avec l'oxygène et l'humidité.

Selon plusieurs auteurs [QUIGLEY et coll. 1970, BÉRARD 1970, BERTRAND et coll. 1991, BALLIVY et coll. 1999], certains facteurs contribuent à l'oxydation de la pyrite tels que : 1) la quantité d'oxygène atmosphérique dissoute, 2) la surface de contact des grains de pyrite (d'où la surface spécifique de la pyrite et des granulats), 3) le degré d'humidité, 4) la température, 5) la présence de minéraux argileux.

L'activité microbienne catalyse l'oxydation de la pyrite [QUIGLEY et coll., 1973a et b]. Les thiobacillus-ferrobacillus et thiobacillus-ferrooxidans oxydent les sulfates ferreux produits au cours de la réaction (1) en sulfates ferriques. Les conditions optimales d'oxydation bactérienne surviennent à un pH de 3,5 et une température de 35°C. Le processus est complètement inhibé à partir de 5°C et en dessous [BERTRAND et coll., 1991].



En retour, ces sulfates ferriques oxydent la pyrite en ions ferreux et en sulfates [Côté 1990].



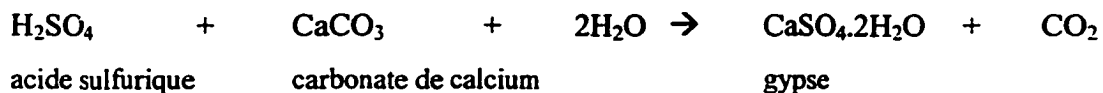
Le fer ferrique devient donc un agent oxydant pour la pyrite, ce qui provoque l'effet catalytique de l'activité microbienne. En effet, selon les études menées par Pugh et Mustin [DIVET, 1996], la vitesse de réaction est neuf fois plus élevée en présence de thiobacillus ferrooxydans. Par contre, selon Singer et Stumm [SINGER et coll., 1970), la présence de ces bactéries peut



permettre d'augmenter la vitesse de réaction par un facteur d'un million [BERTRAND et coll., 1991] dépendant de la surface spécifique, c'est-à-dire du type de pyrite. La jarosite ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_6$ ), de couleur orangée, est un bon indicateur de la présence de bactéries puisque sa production nécessite la présence des sulfates ferriques créés lors de la réaction biochimique [CÔTÉ 1990]. La formation de jarosite est subséquente à la formation du gypse. La jarosite a tendance à recouvrir les plans fracturés de la roche et à remplir les espaces entre les cristaux de gypse [BÉRUBÉ et coll., 1986].

Selon Quigley et Vogan [QUIGLEY et coll., 1970], c'est l'existence de bactéries autotrophiques de types ferrobacille et thiobacille ferrooxidant dans les eaux souterraines qui cause l'oxydation du sulfure de fer disséminé dans les shales.

La formation du gypse, un sulfate de calcium hydraté, implique l'attaque de la calcite présente dans la pierre concassée par l'acide sulfurique produite lors de l'oxydation de la pyrite. Il s'agit d'un produit de neutralisation.



La différence de température entre le remblai et la dalle de béton chauffée crée un gradient thermique qui permet aux ions en solution de migrer par capillarité à la surface. Ces conditions de haute température et de basse pression près de la surface permettent l'évaporation des solutions et la précipitation des minéraux de sulfates dans les pores et les fractures. Ces mécanismes vont durer aussi longtemps que la réserve en pyrite ne sera pas épuisée [BÉRUBÉ et coll., 1986].

Le gypse ainsi formé provoque une augmentation de volume de l'ordre de 100% par rapport aux minéraux originaux, c'est-à-dire la calcite et la pyrite [QUIGLEY 1970, BALLIVY et coll. 1997]. Par contre, des études récentes montrent que l'expansion peut atteindre 300% [BALLIVY et coll., 1999]. Selon Quigley, le gypse se produit seulement au-dessus de la nappe phréatique, dans la zone partiellement saturée par capillarité. Ceci peut être vérifié en comparant la quantité de pyrite retrouvée au-dessus et en dessous du niveau de l'eau. On devrait retrouver un moins grand pourcentage de pyrite dans la partie supérieure. Selon les études de Siwick [SIWICK,

1986 et 1987], la bactérie *thiobacillus ferrooxydans* est présente seulement dans la zone vadose [BERTRAND et coll., 1991]. D'autre part, le soulèvement causé par l'altération géochimique des sulfures peut être précédé par un soulèvement associé à l'hydratation et l'expansion des structures argileuses lamellaires. Par contre, ce type de soulèvement peut être considéré comme négligeable. En présence d'eau, l'espace basal des structures type montmorillonite peut permettre un maximum de cinq couches de molécules d'eau ce qui entraîne un accroissement du paramètre de maille pouvant atteindre les 30Å. Ce cas de gonflement est connu comme réversible. [BALLIVY et coll., 1997]

Seulement un faible pourcentage de pyrite dans le shale est nécessaire pour démarrer la réaction [GRATTAN-BELLEW et coll., 1982]. L'apparition du gypse comme produit de neutralisation entraîne une expansion au sein du remblai. Ceci peut s'expliquer de deux façons. Premièrement, on peut l'expliquer par l'expansion chimique qui consiste en la différence de la masse volumique entre la pyrite (5,02 g/cm<sup>3</sup>), la pyrite framboïdale (4,12 g/cm<sup>3</sup>) et le gypse (2,36 g/cm<sup>3</sup>). Deuxièmement, on peut l'expliquer par l'expansion mécanique qui consiste en l'éclatement du granulat produit par la formation d'un cristal de gypse dans le shale. Les variations de volume sont inversement proportionnelles aux variations de masse volumique [BELLALLOUI et coll., 1999].

Les pressions qui peuvent être exercées par la formation de gypse dans les shales ont été étudiées par plusieurs auteurs. Selon Lutenegger et coll. [LUTENEGGER et coll., 1979] les pressions de cristallisation minimales sont de 28 kPa. D'après Fasiska et coll. [FASISKA, 1974], les pressions peuvent atteindre 500 kPa. Dans la région d'Ottawa, les cas de dommage étudiés par Quigley [QUIGLEY, 1973a] ont mené à une estimation des poussées de gonflement à un minimum de 72 kPa pour une colonne de roche de 3 m. Des études plus récentes réalisées par Côté [CÔTÉ 1990] ont montré que les contraintes occasionnées par l'adsorption d'eau combinée à la cristallisation de gypse peuvent atteindre 2,56 MPa. Il est important de mentionner que les sulfates sont plus solubles à haute pression. On ne rencontre donc pas de sulfates secondaires sous les semelles des fondations [BÉRUBÉ et coll., 1986].

Les conditions pour l'amorce d'une expansion impliquent que :

- des sulfures de fer réactifs soient présents dans les shales ou autre roche de faible résistance mécanique;
- les matériaux de fondation contiennent toujours de la calcite ou autre source de  $\text{Ca}^{++}$ ;
- le minéral réactif doit être exposé à la présence d'oxygène et d'humidité favorables;
- les roches mises en cause doivent contenir des plans (réels ou potentiels) de faiblesse pour permettre la cristallisation des minéraux secondaires à l'intérieur de ces plans.
- une migration des éléments dissous résultant d'un mouvement de capillarité de l'eau pour permettre une interaction avec d'autres éléments ou une augmentation de volume par rupture mécanique de la roche par la poussée des cristaux secondaires en croissance;
- une cristallisation de minéraux secondaires de volume supérieur aux minéraux primaires (calcite, pyrite) pour produire un gonflement.

## 2.4 Phénomène de sulfatation

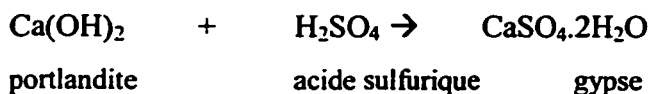
Le béton de ciment peut être attaqué par les sulfates produits par la transformation des sulfures de fer présents dans le matériau de fondation ou par toute autre source de sulfates (eaux souterraines etc.). Les sulfates issus de l'altération du matériau de fondation peuvent migrer dans le béton suite au mouvement de capillarité des solutions, causant ainsi la détérioration de ce dernier [CÔTÉ, 1990] (voir figure 2.2). Les dalles de béton sont donc plus susceptibles à cette altération chimique.



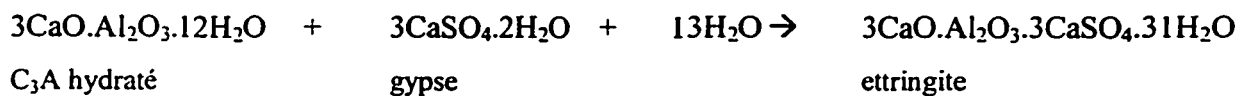
**Figure 2.2** Sulfatation d'une dalle de béton

L'attaque sulfatique du béton peut accompagner ou non (ex. dans les Prairies canadiennes) le gonflement du remblai. Dans le cas où les granulats seraient très pauvres ou exempts de carbonates, les sulfates néoformés avec la montée de la nappe peuvent migrer vers la partie supérieure et provoquer ainsi une sulfatation à la base de la dalle en béton. Si les carbonates disponibles sont présents en teneurs relativement modérées, le gonflement du remblai et la sulfatation de la dalle de béton sont susceptibles de se produire simultanément [BELLALOUÏ et coll., 1999]. Il faut aussi tenir compte d'autres facteurs comme la porosité du béton et de la nature du ciment utilisé.

L'acide sulfurique produit par cette réaction attaque prioritairement la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) de la pâte de ciment pour ensuite former du gypse secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise [DIVET, 1996].



Ce gypse ainsi formé ou déjà présent dans la solution réagit avec les aluminates tricalciques hydratés de la pâte de ciment pour donner de l'ettringite secondaire. Le volume molaire final peut être de trois à huit fois plus élevé que celui du solide initial [DIVET, 1996].



C'est donc l'apparition de gypse et d'ettringite secondaire dite gonflante qui crée l'augmentation de volume et la fissuration du béton. Elle a aussi comme effet pernicieux d'affaiblir la masse de béton en réduisant sa résistance mécanique et éventuellement de produire d'abord une décoloration, puis une délamination et dans les cas extrêmes, une désagrégation complète du béton.

## 2.5 Dommages

Dans le cas de structures reposant directement sur le roc, « l'altération de la pyrite a des conséquences particulièrement destructrices en raison des accroissements de volume et de

contraintes qui accompagnent l'oxydation et les réactions chimiques entre les produits d'oxydation et les autres composants des couches pyriteuses. Les variations de volume dues à l'altération de la pyrite causent des désordres souvent limités aux dalles de béton posées directement sur la roche. Ces soulèvements différentiels ont des effets particulièrement destructeurs sur les cloisons, les accessoires et les portes » [PENNER et coll., 1975]. Lorsque des distorsions de la structure sont observables et que les mouvements continuent, c'est l'intégrité structurale du bâtiment qui peut être affectée [QUIGLEY et coll., 1970].

C'est la formation du gypse qui crée des accroissements de volume ponctuels en désorganisant le shale. Ceci mène à un mécanisme d'affaiblissement et augmente les caractéristiques de gonflement. Les contraintes différentielles associées à un gonflement non uniforme augmentent la propagation des fissures. [MORGENSTERN, 1970]

Quigley et coll. [1973a], Penner et coll. [1975], Bérubé et coll. [1986] ainsi que Quigley et coll. [1970] ont été les premiers à observer et à rapporter différents types de dommages associés au gonflement du roc. Côté [1990] a été le premier à observer et à rapporter différents types de dommages associés au gonflement de remblai.

Dans le cas de dalles sur remblais de pierre concassée, on sait que « la faible résistance en flexion des dalles de béton est responsable de leur tendance à la déformation et que d'infimes déplacements peuvent causer des dommages considérables. Les déformations structurales visibles dans le bâtiment sont permanentes et irréversibles » [CÔTÉ 1990].

« Les principaux dommages résultent de la fissuration des dalles et de la différence d'élévation entre les deux lèvres d'une même fissure. Les bombements de dalles sont toujours accompagnés de longues fissures orientées du centre vers l'extérieur, formant ainsi une structure en forme de dôme, tandis que les soulèvements en bordure des murs porteurs seront orientés parallèlement à ces derniers » [CÔTÉ 1990].

« Les murs en éléments de maçonnerie édifiés sur la surface d'une telle dalle présentent des lézardes et occasionnellement des dislocations des éléments. Si les divisions intérieures s'appuient ou supportent le plancher d'un second étage, ce dernier peut montrer des déformations

ainsi qu'un patron de fissuration parallèle et perpendiculaire aux éléments de division. Des déformations peuvent aussi être observées dans les murs de fondation. Elles peuvent résulter d'une poussée latérale due à un remblai composé de shale le long de ces derniers ou de la poussée retransmise en haut de mur par les dalles soumises à un soulèvement. Il est aussi possible d'observer une rotation du mur de fondation qui consiste en un déplacement horizontal de la partie supérieure » [CÔTÉ 1990].

Les inconvénients associés aux problèmes du soulèvement de dalles sont directement reliés à leur fissuration et, outre l'aspect esthétique, ils incluent une perte de jouissance d'espace, des dépenses imprévues de réhabilitation et une perte d'évaluation foncière [PERRIER et coll., 1999].

## **2.6 Remédiations**

Présentement, le moyen le plus simple et le plus efficace pour remédier au problème de gonflement du remblai consiste à détruire la dalle de béton endommagée, d'excaver tout le remblai réactif jusqu'au terrain naturel, de remplir l'excavation par du remblai non gonflant, de placer un polythène et de couler une nouvelle dalle de béton. Malgré sa simplicité, cette méthode reste coûteuse et occasionne une perte de jouissance des lieux pendant toute la période des travaux qui peuvent s'échelonner de plusieurs jours à quelques semaines.

D'autres solutions ont été envisagées par Quigley et coll. [1970], par Bérubé et coll. [1986]. Les voici :

Le gonflement des shales pyriteux est premièrement causé par des conditions d'oxydation propices à activer un soulèvement. Si l'entrée de l'oxygène sous les fondations peut être empêchée, la probabilité d'oxydation, même par les bactéries, peut être grandement réduite. Un des moyens proposés par Quigley [QUIGLEY et coll., 1970] est de submerger les granulats par un système de drainage des fondations soigneusement conçu, ce qui peut s'avérer assez ardu à réaliser et à contrôler. L'humidité du lieu peut augmenter et devenir insupportable. Cette proposition de solution ne peut être recommandée sans certains risques.

Une autre approche serait d'augmenter le pH des solutions interstitielles dans le sol en appliquant des fongicides par dilution ou addition de produit chimique comme l'hydroxyde de potassium. Ceci arrêterait ou minimiserait l'oxydation de la pyrite et l'accroissement du nombre de bactéries. Par contre, il ne faudrait pas considérer cette solution à long terme. [BÉRUBÉ et coll., 1986] Cette proposition n'est donc pas pratique et comme la précédente, elle n'a pas été éprouvée.

Lors de travaux de réparation, il serait aussi possible d'enlever une certaine quantité de matériel altéré et laisser un vide entre le sol et le plancher pour permettre un certain gonflement supplémentaire [BÉRUBÉ et coll., 1986]. Cette méthode n'est envisageable que si l'on croit que la réaction est pratiquement ou tout à fait terminée i.e. que toute la pyrite présente a été oxydée. Cette proposition n'a donc pas d'application qui puisse offrir une garantie.

## **2.7 Réglementation sur la construction**

Antérieurement à la crise causée par les gonflements pyriteux, il faut rappeler qu'un code du bâtiment qui recommandait une pierre nette obligeait, lors de la construction des maisons, le contrôle de la qualité de la pierre de remblai sous la dalle du sous-sol alors qu'au garage, n'importe quel matériau granulaire pouvait être utilisé. La mauvaise qualité du shale concassé en fait un matériau qui se vend à très bas prix sur le marché de la construction. Les bas prix ont favorisé son utilisation dans la construction résidentielle, où il n'y a pas de contrôle de la qualité [Côté 1990]. Voici les règles que le code du bâtiment de 1995 énonce lors de la construction de fondations et de planchers sur sol :

L'article 4.2.4.13. *Gonflement et retrait du sol* stipule :

- 1) S'il appert ou s'il est reconnu qu'un sol est susceptible de gonflement ou de retrait et que ces mouvements peuvent endommager l'ouvrage, cette condition doit faire l'objet d'une étude approfondie et la conception doit en tenir compte.

L'article 4.2.4.14. *Gonflement ou détérioration de la roche* stipule :

- 1) S'il est reconnu que le terrain est composé de roche qui gonfle ou se détériore sous l'effet de conditions naturelles défavorables ou d'une libération de contrainte, cette condition doit faire l'objet d'une étude approfondie et la conception de l'ouvrage doit en tenir compte.

**L'article 4.2.5.8. *Remblayage* stipule :**

- 1) Les matériaux de remblayage d'une excavation doivent être mis en place de façon :**
  - a) à fournir un support latéral au sol adjacent à l'excavation ; et**
  - b) à prévenir les mouvements nuisibles**
- 2) Les matériaux de remblayage d'une excavation ou le remblai supportant une semelle, une fondation ou un plancher sur sol ne doivent pas, par nature, être sujets à des variations volumétriques dues aux changements de température et de teneur en eau.**

**L'article 9.16.2.1. *Mise en œuvre exigée* stipule :**

- 1) Sous réserve du paragraphe 2), il faut prévoir, pour les planchers sur sol, une assise d'au moins 100 mm d'épaisseur en granulats grossiers propres ne contenant pas plus de 10% de matériaux traversant un tamis de 4mm. (Voir l'alinéa 9.13.1.3. 2)c), l'article 9.13.8.2. et les notes A-9.13.1.3. et A-9.13.8.2.)**
- 2) Une assise en granulats n'est pas nécessaire sous :**
  - a) une dalle de garage, un abri d'automobile ou un bâtiment secondaire ;**
  - b) un établissement industriel si la nature des procédés qui s'y déroulent permet ou exige la présence de grandes ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment, même durant l'hiver ; ou**
  - c) un bâtiment érigé à un endroit où il peut être démontré que les émanations de gaz du sol ne constituent pas un danger.**

**L'alinéa 9.13.1.3. 2c) *Protection exigée contre les gaz souterrains* stipule :**

- 2) Une construction conçue pour empêcher l'infiltration de gaz souterrains dans le bâtiment n'est pas exigée dans les cas suivantes :**
  - c) Les bâtiments qui contiennent un seul logement et qui sont munis d'un système de dépressurisation sous le plancher, conformément à l'article 9.13.8.2;**

**L'article 9.13.8.2 *Dépressurisation sous le plancher*:** cet article indique dans quel cas il faut protéger les planchers contre l'infiltration de gaz souterrains en utilisant un système de dépressurisation sous le plancher.



**La note A-9.13.1.3 *Réduction des infiltrations de gaz souterrains* :** cette note décrit les deux principales méthodes pour réduire les infiltrations de radon lors de la construction de logements, le radon étant l'un des polluants souvent contenus dans le sol.

**La note A-9.13.8.2 *Protection contre l'infiltration de gaz souterrains par dépressurisation* :** cette note indique comment mettre en place un système de dépressurisation et comment faire l'analyse de la concentration de radon dans le sol.

## **2.8 Travaux de recherche antérieurs**

Les travaux de François Côté, réalisés sous la direction du professeur Jean Bérard, dans le cadre de son mémoire de maîtrise [Côté 1990] ont permis d'approfondir les connaissances sur l'altération du shale noir pyriteux. Il a, entre autre, simulé en laboratoire certaines conditions de remblais de fondations afin de mesurer le gonflement.

Voici les principaux objectifs de recherche qu'il avait visés :

1. Établir une relation entre le remblai de fondation potentiellement gonflant et les fissures observées dans la structure de bâtiments ;
2. Mettre au point des essais en laboratoire permettant de :
  - simuler le phénomène de gonflement du shale noir pyriteux
  - mesurer la force d'expansion ;
3. Apporter une meilleure connaissance des facteurs favorisant l'expansion afin d'éviter les erreurs passées ou peut-être atténuer ou éliminer les méfaits de ces roches expansives.

Premièrement, François Côté a démontré que le gonflement de shale pyriteux peut causer des déformations importantes aux bâtiments supportés par une fondation granulaire contenant ce matériau. Puis, il a décrit les formations géologiques de la région de Montréal qui pourraient être problématiques, soit le shale d'Utica et la formation de Lorraine.

Deuxièmement, François Côté s'est penché sur la compréhension des transformations minérales qui provoqueraient l'augmentation de volume du matériau de fondation . Il a établi chacune des étapes de réaction du processus chimique telle que décrit précédemment.

Troisièmement, François Côté a tenté de mettre au point des essais en laboratoire permettant de prouver et de quantifier le gonflement d'un matériau de fondation constitué de shale noir pyriteux. Il a tout d'abord voulu vérifier le gonflement d'un shale noir pyriteux soumis à des conditions semblables à celles subies par un matériau de fondation sous un bâtiment chauffé. Les expansions maximales obtenues sont de 0,84% avec le premier échantillon et de 0,42% avec le deuxième échantillon. Ces résultats sont directement proportionnels au temps ainsi qu'à l'épaisseur de la colonne de shale concassé. Suite à ces essais, le shale a été reconnu comme expansif et que des minéraux secondaires tels que le gypse, absents avant l'expérience, ont certainement été produits par suite de l'oxydation de la pyrite dans le shale.

Il a, par la suite, voulu quantifier les charges occasionnées par la cristallisation de gypse dans le shale en utilisant une solution saturée en sulfate de calcium. La contrainte maximale obtenue est de 2,56 MPa. Puisque l'essai a été arrêté volontairement, il a pu conclure que la contrainte de cristallisation du gypse est supérieure ou égale à 2,56 MPa. Il croit aussi que dans le cas du shale, l'adsorption d'eau joue un rôle considérable dans le gonflement.

Le présent mémoire veut poursuivre et compléter les recherches entreprises par François Côté sur la problématique des shale pyriteux gonflants. Premièrement, la méthodologie utilisée lors de l'investigation de cas résidentiels est présentée au chapitre 3. Les résultats obtenus suivent au chapitre 4. L'analyse des données recueillies lors de l'investigation ainsi que leur interprétation se retrouvent au chapitre 5. Le projet d'instrumentation est décrit au chapitre 6. On y retrouve l'analyse de 5 cas de garages ayant subi des dommages. Finalement, le chapitre 7 étudie la caractérisation et le gonflement de trois échantillons de remblais gonflants à l'aide d'un essai de mesure du potentiel de gonflement résiduel.

### **3 INVESTIGATION DE CAS RÉSIDENTIELS**

L'Université de Sherbrooke et l'École Polytechnique de Montréal ont eu la responsabilité de mener à terme une enquête de propriétés affectées par le gonflement de remblai pyriteux. Cette étude de cas est entérinée par le Comité Technique Québécois (CTQ) sous l'égide de la Société d'Habitation du Québec (SHQ) et financée par la Société Canadienne d'Hypothèques et de Logement (SCHL).

#### **3.1 Procédure**

Deux étudiants à la maîtrise, Alexandre Dion de l'École Polytechnique et Caroline Pépin de l'Université de Sherbrooke, étaient en charge de la planification des visites sur le terrain. L'approche des propriétaires de bâtiments résidentiels s'est faite par l'entremise de l'Association des Consommateurs pour la Qualité dans la Construction (ACQC). Depuis l'automne 1998, l'ACQC avait fait circuler un formulaire sur la pyrite auprès de ses membres et à des propriétaires de maisons dans plusieurs municipalités du Québec, notamment sur la Rive-Sud de Montréal. Les personnes contactées constituent donc l'ensemble des propriétaires ayant retourné le formulaire sur la pyrite à l'ACQC et résidant dans les villes sélectionnées (Longueuil, Boucherville et St-Bruno-de-Montarville). Les propriétaires ont alors été invités à participer à une étude gouvernementale qui consiste à effectuer un relevé visuel des dommages structuraux au sous-sol et au garage. La même procédure a été suivie à partir de quelques rapports d'analyses provenant du laboratoire Quéformat Ltée dont les résultats montraient un certain potentiel de gonflement. Il est important de souligner qu'un bon nombre de maisons montrant des dommages importants n'ont pas pu être visitées, car les propriétaires avaient fait refaire leur dalle au moment de la campagne.

Une journée de terrain comprend environ huit visites de maisons d'une heure chacune. Chaque relevé visuel consiste à faire les observations sur les lieux et à remplir un formulaire qui est une version légèrement modifiée du protocole CTQ-M200 version 1.1. Le formulaire modifié comprend quatre sections : identification de la propriété, relevé des désordres au sous-sol, relevé des désordres au garage et croquis des désordres (sous-sol et garage). La visite permet aussi de

répondre aux questions des propriétaires au sujet de la pyrite et de donner des informations selon les besoins. Si le propriétaire a déjà fait faire une analyse de remblai dans un laboratoire d'expertise, le nom du laboratoire, le numéro de dossier ainsi que quelques données sont notés dans le formulaire avec l'approbation du propriétaire.

L'ensemble des rapports des relevés visuels manuscrits a été informatisé principalement par Alexandre Dion. Tous les renseignements des rapports sont compilés dans un fichier ACCESS pour permettre un meilleur traitement des données. L'analyse des données se fait à l'aide des logiciels ACCESS et EXCEL par Caroline Pépin.

### **3.2 Méthodologie d'enquête**

L'ensemble des 224 maisons a été visité entre le 17 mai 1999 et le 1<sup>er</sup> septembre 1999. Les propriétaires qui ont rempli le formulaire de l'ACQC ont fait état des dommages, soit dans leur garage, soit dans leur sous-sol, soit dans les deux pièces. Même si seul le remblai d'une pièce était soupçonné comme pyriteux par le propriétaire, les équipes d'investigation ont réalisé un relevé visuel dans le sous-sol et dans le garage, s'il en existait un, sans distinction, pour chaque maison visitée.

#### **3.2.1 Fiche : Identification de la propriété**

Lors des visites, plusieurs questions ont été demandées aux propriétaires à propos de leur propriété. On retrouve au tableau 3.1 la section du formulaire qui comprend l'ensemble de ces questions.

**TABLEAU 3.1 IDENTIFICATION DE LA PROPRIETE (ADAPTATION DU PROTOCOLE CTQ-M200)**

Adresse civique	:	
Type de bâtiment	:	
Année de construction	:	
Année d'acquisition	:	
Propriétaire actuel	:	
Évaluation municipale	:	
Terrain	:	
Bâtiments:	:	
Année de l'évaluation	:	
Agent et/ou courtier	:	
Contracteur	:	
Autres informations	:	

L'adresse civique est celle de la maison visitée et non celle du propriétaire dans le cas d'une location de la bâtisse résidentielle. Le type de bâtiment donne une idée générale du type de maison visitée. Les bâtiments visités ici sont utilisés comme lieu de résidence seulement. Aucun bâtiment à bureaux, industriel, commercial, gouvernemental ou autre, n'a été visité. L'année de construction est celle à laquelle la maison a été bâtie. Si le garage a été construit après la maison, l'année de construction du garage est aussi indiquée. L'année d'acquisition indique à quel moment le propriétaire actuel a acheté la maison. L'historique de la maison et les questions portant sur l'utilisation du garage et du sous-sol concernent le dernier propriétaire seulement. L'évaluation du terrain et des bâtiments est celle que l'on retrouve sur le dernier compte de taxes de la ville. L'année d'évaluation est la dernière année à laquelle la municipalité a fait l'évaluation. Le facteur comparatif est de 1 pour les trois villes étudiées. L'agent et/ou le courtier qui a fait la dernière transaction immobilière de la maison est aussi mentionné mais peu de données ont été recueillies à cet effet. Le contracteur qui a construit la maison est finalement indiqué s'il est connu du propriétaire actuel. D'autres informations pouvant être d'intérêt pour l'investigation ont été ajoutées.

### **3.2.2 Fiche : Relevé des désordres au sous-sol**

La deuxième partie du relevé est le relevé des désordres au sous-sol. On y retrouve des questions sur les dommages observables affectant la dalle de béton (nombre et type de fissures, soulèvements, etc.) et aussi les autres composantes de la pièce comme l'état des portes et des cloisons. Cette section du relevé comprend également des informations sur l'extérieur de la maison comme la position des gouttières et l'état des murs de fondation du sous-sol et l'attitude du terrain observé. Le tableau 3.2 présente la partie du formulaire servant à cette prise de données dans l'ordre suivant :

1<sup>re</sup> étape : l'observateur prend les dimensions du sous-sol en mètres. Les dimensions incluent la somme des surfaces de toutes les pièces du sous-sol étudié. Le pourcentage de béton à découvert est ensuite inscrit, car c'est le béton visible qui est utile pour l'étude. Le type de revêtement de la dalle de béton est aussi noté. Il peut s'agir de peinture, de sous-plancher ou de tout autre revêtement. Ceci est surtout important dans le cas du sous-sol. La dalle du sous-sol se trouve normalement à proximité de la nappe phréatique qui contribue à humidifier le remblai par capillarité. Dans le cas des garages, le revêtement sert plus à protéger le béton de l'usure et de la dégradation causées par la voiture et le sel de déglacage.

2<sup>e</sup> étape : la fissuration du béton est examinée. On classe les fissures selon différents types : longitudinales, en étoile, microfissures. Les fissures longitudinales se sont formées dans le sens de la longueur en général. Les fissures en étoiles comprennent un minimum de trois branches ayant une extrémité commune (voir figure 3.1). Les microfissures sont à peine perceptibles et les lèvres de la fissure sont encore en contact. Il est aussi possible qu'aucune fissure ne soit visible sur la surface de béton à découvert.

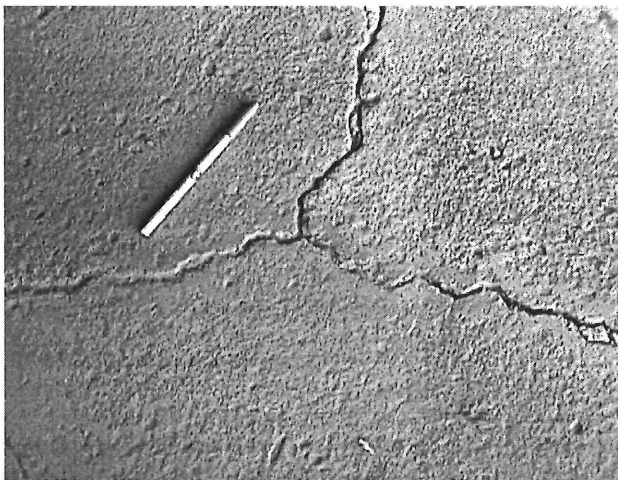
**TABEAU 3.2 RELEVÉ DES DESORDRES AU SOUS-SOL (ADAPTATION DU PROTOCOLE CTQ-M200)**

Dimensions nominales (m) :	
% de surfaces de béton :	Revêtement :
<u>Nombre de fissures dans la dalle du sous-sol</u> <input type="checkbox"/> plusieurs fissures longitudinales <input type="checkbox"/> une ou deux fissures longitudinales <input type="checkbox"/> plusieurs fissures en étoile <input type="checkbox"/> une ou deux fissures en étoile <input type="checkbox"/> microfissures <input type="checkbox"/> aucune fissure  <u>Ouverture moyenne des fissures</u> <input type="checkbox"/> fine : moins de 1 mm <input type="checkbox"/> moyenne : entre 1 et 2 mm <input type="checkbox"/> importante: entre 2 et 5 mm <input type="checkbox"/> très importante : plus de 5 mm <input type="checkbox"/> fissures colmatées  <u>Présence de poudre blanchâtre</u> <input type="checkbox"/> associé aux fissures      Quantité: ❶ ❷ ❸ <input type="checkbox"/> joint dalle-mur      Quantité: ❶ ❷ ❸ <input type="checkbox"/> autres endroits: _____  <u>Amplitude des soulèvements perceptibles</u> mm/m <input type="checkbox"/> aucun soulèvement perceptible  <u>Terrain</u> <input type="checkbox"/> plat <input type="checkbox"/> incliné vers la rue <input type="checkbox"/> incliné vers l'arrière <input type="checkbox"/> surélevé <input type="checkbox"/> surabaissé <input type="checkbox"/> autre: _____	<u>Murs de fondation (section sous-sol)</u> <input type="checkbox"/> présence de fissures aux coins: _____ <input type="checkbox"/> présence de fissures entre les coins: _____ <input type="checkbox"/> déplacement du mur vers l'extérieur: _____ <input type="checkbox"/> aucun déplacement perceptible <input type="checkbox"/> aucune fissure  <u>Cloisons du sous-sol</u> <input type="checkbox"/> fissurées <input type="checkbox"/> flambage <input type="checkbox"/> aucun dommage <input type="checkbox"/> pas de cloison  <u>Portes au sous-sol</u> <input type="checkbox"/> ferment mal <input type="checkbox"/> aucun dommage <input type="checkbox"/> pas de porte  <u>Dommages à l'étage</u> <input type="checkbox"/> soulèvement du plancher à l'étage: _____ <input type="checkbox"/> cloisons avec dommages: _____ <input type="checkbox"/> aucun dommage à l'étage <input type="checkbox"/> autre dommage: _____  <u>Gouttière extérieure</u> <input type="checkbox"/> absente <input type="checkbox"/> s'égoutte près de la fondation <input type="checkbox"/> s'égoutte loin de la fondation <input type="checkbox"/> autre: _____
Remarques : (lézardes briques, arbres...):	

\* Pour la quantité, les codes correspondent aux qualificatifs suivants ❶ rare ❷ intermédiaire ❸ abondante

Il se peut aussi que l'on observe une fissure en forme de quart de cercle dans un coin de la dalle de béton. Ce type de fissure est causé par un tassement différentiel. Les tassements différentiels sont produits soit par un mauvais compactage des matériaux de remplissage autour de la maison ou soit par un assèchement accru du sol à un certain moment. Il est aussi plausible de voir un

réseau de fissures sans gonflement. Ces fissures peuvent être attribuables au retrait du béton lors de son séchage. Le séchage naturel du béton peut créer un retrait plastique (ou de dessiccation) lorsqu'il est d'origine hydrique (il peut aussi être d'origine thermique dans les ouvrages de grand volume). Le volume des hydrates formés dans la réaction d'hydratation est nettement inférieur à la somme des volumes des deux constituants, ciment anhydre et eau, qui entrent dans la réaction [Acker 1988]. Ainsi, à la fin de prise lorsque la pâte devient beaucoup moins déformable, le séchage entraîne des contraintes en traction qui peuvent fissurer le béton jeune ayant peu de résistance en traction. Par conséquent, plus le béton contient d'eau, plus le retrait a la possibilité d'être important. Ainsi, la fissuration du béton peut être la combinaison de plusieurs phénomènes. Si l'on croit que la fissuration n'est pas seulement attribuable au gonflement du remblai, on l'indique dans la section remarque du tableau du formulaire.



**Figure 3.1 Fissure en étoile**



**Figure 3.2 Mesure de l'ouverture d'une fissure**

3<sup>e</sup> étape : l'ouverture moyenne des lèvres des fissures est relevée (voir figure 3.2). L'ouverture des fissures est classée dans l'une des quatre catégories prédéfinies : fine (moins de 1 mm), moyenne (entre 1 et 2 mm), importante (entre 2 et 5 mm) et très importante (plus de 5 mm). Il se peut aussi que le propriétaire ait colmaté les fissures. Il est alors impossible de connaître l'ouverture des fissures à moins qu'elles ne soient réactivées. Il y a deux sortes de matériau de colmatage. Premièrement, il y a les matériaux de nature rigide qui refissure dès qu'il y a un léger mouvement des lèvres de la fissure. Deuxièmement, il y a les matériaux flexibles. Ils peuvent donc suivre les mouvements légers de la fissure.



4<sup>e</sup> étape : la présence de poudre blanchâtre est considérée, observée et notée (voir figure 3.3). Deux endroits distincts sont indicateurs de la présence de poudre blanchâtre : le long des fissures et au joint de la dalle de béton avec le mur de fondation. Pour chaque endroit, une appréciation de la quantité de poudre blanchâtre est donnée : aucune, rare, intermédiaire et abondante. Il est difficile de réellement quantifier la quantité de poudre blanchâtre produite car, la plupart des propriétaires balayent souvent le plancher et généralement, le seul usage normal des pièces disperse la poudre blanchâtre un peu partout. Aussi, on peut retrouver plus de poudre blanchâtre sous les plinthes chauffantes dû à l'évaporation plus grande ainsi qu'autour du chauffe-eau. Il se peut qu'une légère efflorescence soit présente sans être un signe de sulfatation. Il s'agit alors d'une efflorescence qui provient du gypse utilisé dans le broyage du clinker pour en empêcher la prise rapide.



**Figure 3.3 Cristaux blanchâtres (efflorescence) Figure 3.4 Mesure du soulèvement**

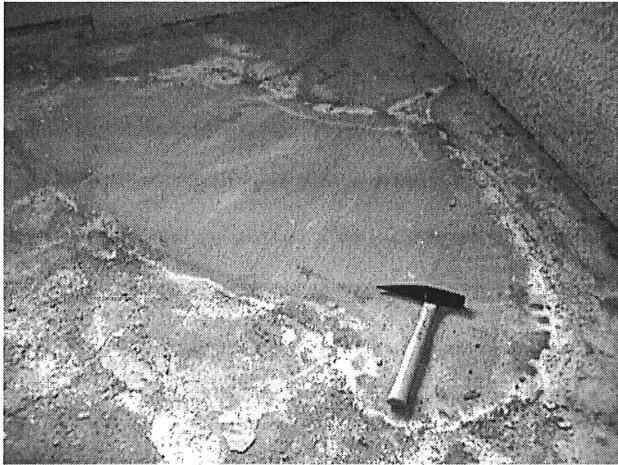
5<sup>e</sup> étape : l'amplitude des soulèvements perceptibles est mesurée en mm/m. L'amplitude est d'abord mesurée à l'aide d'un niveau de deux mètres que l'on centre sur la crête de la bosse (voir figure 3.4). Le résultat est ensuite ramené en mm/m linéaire en divisant par deux. Le soulèvement *maximal* est retenu. Il peut y avoir plusieurs autres soulèvements intermédiaires. Il se peut aussi que l'on ressente des soulèvements du plancher à travers le revêtement. Dans ce cas, l'amplitude du soulèvement n'est pas mesurée mais seul l'emplacement du soulèvement est reporté sur le croquis des désordres. Aussi, il peut arriver que le propriétaire ait cassé la dalle de béton à l'endroit du soulèvement pour égaliser son plancher (voir figure 3.5). On mesure alors un

soulèvement moindre à ce qu'il a déjà été. De plus, il arrive souvent que le béton du sous-sol ait été mal nivelé lors de la construction. On peut alors mesurer un faux soulèvement de quelques mm.

Règle générale, on retrouve une couche plus mince de remblai sous la dalle de béton du sous-sol que sous celle du garage. Ainsi, si l'on retrouve exactement le même type de remblai sous la dalle de béton du sous-sol et du garage, et que ces deux remblais sont dans le même environnement (température, humidité, bactéries...), le soulèvement mesuré au sous-sol devrait être moindre que celui mesuré au garage. En effet, s'il y a moins épais de remblai sous la dalle, il y a donc moins de pyrite qui peut entrer en réaction pour produire du gypse et du gonflement.

Par contre, il arrive très souvent que le remblai du sous-sol et celui du garage diffèrent de composition pétrographique. En effet, l'alinéa 9.16.2.1. 2)a) du Code national du bâtiment – Canada 1995 mentionne qu'une assise en granulats n'est pas obligatoire sous une dalle de garage. Ainsi, le constructeur de la maison, bien que ce soit souhaitable n'a pas l'obligation de mettre des granulats grossiers propres comme au sous-sol. Il peut mettre à peu près n'importe quoi qui respecte l'article 4.2.5.8. du CNB 1995 (voir section 2.7 *Réglementation sur la construction*). Par conséquent, les résidus de carrière seraient acceptables. Ce type d'assise a la probabilité d'engendrer plus de problèmes ; il ne devrait évidemment pas être utilisé.

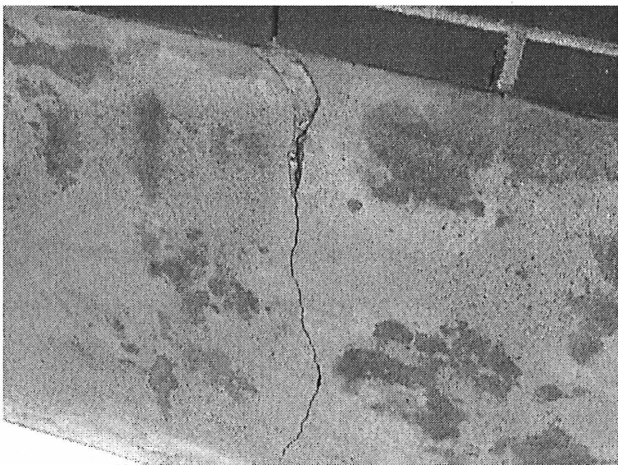
6<sup>e</sup> étape : les murs de fondation entourant le sous-sol sont inspectés de l'intérieur et de l'extérieur de la maison. Sur les parties visibles, toutes les fissures apparentes sont relevées. La distinction est faite entre les fissures se trouvant aux coins des murs de fondation (voir figure 3.6) et celles se trouvant entre les coins, le long des murs de fondation (voir figure 3.7). Les fissures aux coins des murs de fondation du sous-sol sont majoritairement en forme de cône inversé. En effet, il s'agit d'un point de faiblesse qui supporte une grande partie de la charge de la maison. Les fissures observées sont classées, soit mineures soit majeures, selon l'ouverture des lèvres de la fissure. Les fissures aux coins des fenêtres ou dans le crépis sont aussi notées et sont classées comme mineures. Certaines fissures peuvent avoir été colmatées par leur propriétaire (voir figure 3.8). Le déplacement d'une lèvre de la fissure par rapport à l'autre est aussi noté et classé comme nul, faible, moyen, important ou très important.



**Figure 3.5 Béton remis au niveau**



**Figure 3.6 Fissure au coin d'une fondation**



**Figure 3.7 Fissure entre les coins**



**Figure 3.8 Fissure colmatée (mur extérieur)**

7<sup>e</sup> étape : on relève l'état des cloisons du sous-sol, si elles sont fissurées, ont subi du flambement ou si elles n'ont subi aucun dommage. On regarde aussi les conditions des portes au sous-sol i.e. si elles ferment bien ou non. Un soulèvement de la dalle de béton peut empêcher le bon usage des portes. Finalement, on va voir à l'étage si le soulèvement de la dalle de béton au sous-sol n'a pas causé des dommages comme le soulèvement du plancher à l'étage vis-à-vis des cloisons du sous-sol.

8<sup>e</sup> étape : on prend note de la configuration du système de gouttières entourant le sous-sol ainsi que de l'endroit où elles s'égouttent par rapport à la fondation (près ou loin). On note aussi la dénivellation du terrain à l'avant et à l'arrière de la maison. On croit effectivement que la qualité du drainage du remblai des fondations ainsi que celui du terrain pourrait avoir une influence sur

la vitesse de réaction de la pyrite. En effet, le degré d'humidité est l'un des facteurs contribuant à l'oxydation de la pyrite (voir 2.3 *Phénomène de gonflement*).

9<sup>e</sup> étape : il est possible d'inscrire au rapport des remarques pertinentes comme l'observation de briques lézardées (normalement au niveau des fissures des murs de fondation) ou de la sulfatation anormale de la dalle de béton, de la présence de gros arbres près de la fondation (assèchement du sol dû au pompage de l'eau souterraine par les racines), fuite d'une piscine ou toute autre information utile. La sulfatation des dalles de béton provient très probablement de la génération de sulfates dans le remblai sous la dalle.

### 3.2.3 Fiche : Relevé des désordres au garage

La troisième partie du relevé visuel est le relevé des désordres au garage. On y retrouve des questions semblables à celles du relevé des désordres au sous-sol comme les dommages observables affectant la dalle de béton. On y retrouve aussi des questions portant sur l'utilisation et l'entretien du garage par les propriétaires. Le tableau 3.3 présente la partie du formulaire servant à cette prise de données.

1<sup>re</sup> étape : les dimensions intérieures du garage sont notées. Elles incluent l'escalier menant au sous-sol s'il y en a un. On indique par la même occasion s'il s'agit d'un garage simple ou double. Un garage double peut comporter deux portes de garage ainsi qu'un pilier central. L'état du pilier central, fissuré ou non, est aussi indiqué. Le pourcentage de béton visible ainsi que le type de revêtement du béton sont inscrits au rapport.

**TABEAU 3.3 RELEVÉ DES DESORDRES AU GARAGE (ADAPTATION DU PROTOCOLE CTQ-M200)**

Dimensions nominales (m) :	
% de surfaces de béton :	Revêtement :
<u>Nombre de fissures dans la dalle du garage</u> <input type="checkbox"/> plusieurs fissures longitudinales <input type="checkbox"/> une ou deux fissures longitudinales <input type="checkbox"/> plusieurs fissures en étoile <input type="checkbox"/> une ou deux fissures en étoile <input type="checkbox"/> microfissures <input type="checkbox"/> aucune fissure  <u>Ouverture moyenne des fissures</u> <input type="checkbox"/> fine : moins de 1 mm <input type="checkbox"/> moyenne : entre 1 et 2 mm <input type="checkbox"/> importante : entre 2 et 5 mm <input type="checkbox"/> très importante : plus de 5 mm <input type="checkbox"/> fissures colmatées  <u>Présence de poudre blanchâtre</u> <input type="checkbox"/> associé aux fissures    Quantité: ① ② ③ <input type="checkbox"/> joint dalle-mur        Quantité: ① ② ③ <input type="checkbox"/> autres endroits: _____  <u>Amplitude des soulèvements perceptibles</u> mm/m <input type="checkbox"/> aucun soulèvement perceptible  <u>Porte de garage</u> <input type="checkbox"/> se ferme bien <input type="checkbox"/> se ferme mal <input type="checkbox"/> ne se ferme plus  <u>Type de garage</u> <input type="checkbox"/> simple <input type="checkbox"/> double	<u>Murs de fondation (section garage)</u> <input type="checkbox"/> présence de fissures aux coins: _____ <input type="checkbox"/> présence de fissures entre les coins: _____ <input type="checkbox"/> déplacement du mur vers l'extérieur: _____ <input type="checkbox"/> _____ aucun déplacement perceptible <input type="checkbox"/> aucune fissure  <u>Pièces attenantes au garage</u> <input type="checkbox"/> oui: _____ <input type="checkbox"/> dommages: _____ <input type="checkbox"/> aucun dommage <input type="checkbox"/> pas de pièce attenant  <u>Lavage de voitures dans le garage</u> <input type="checkbox"/> fréquent <input type="checkbox"/> rare <input type="checkbox"/> jamais  <u>Température moyenne en hiver du garage</u> °C <input type="checkbox"/> garage non chauffé  <u>Gouttière extérieure</u> <input type="checkbox"/> absente <input type="checkbox"/> s'égoutte près de la fondation de garage <input type="checkbox"/> s'égoutte loin de la fondation de garage  <u>État du pilier central du garage double</u> <input type="checkbox"/> fissuré <input type="checkbox"/> non fissuré
Remarques : (lézardes briques, arbres...):	

\* Pour la quantité, les codes correspondent aux qualificatifs suivants ① rare ② intermédiaire ③ abondante

2<sup>e</sup> étape : la fissuration du béton est examinée de la même manière qu'au sous-sol. Au garage, les fissures longitudinales peuvent suivre la longueur du mur extérieur, être transversales ou bien être parallèles à la dalle d'entrée du garage ou en étoile. Normalement, la dalle d'entrée fait environ 30 cm de largeur, est plus épaisse pour mieux résister au gel et se situe sous la porte de garage.

Certains garages ne comportent pas de dalle d'entrée. Si la dalle d'entrée est fracturée, il est possible qu'à l'hiver le gel entre dans les fissures et amplifie les dommages à l'avant de la dalle de béton du garage. Les cycles de gel/dégel peuvent aussi provoquer la fissuration de la dalle de béton et de la dalle d'entrée. Il est donc bien important de savoir distinguer les différentes causes de fissuration, surtout au garage : gonflement du remblai, gel, tassements différentiels, retrait du béton.

Ensuite, l'ouverture moyenne des lèvres des fissures est relevée comme au sous-sol, selon les mêmes catégories prédéfinies. Puis, la présence de poudre blanchâtre est notée aux deux endroits distincts déjà établis.

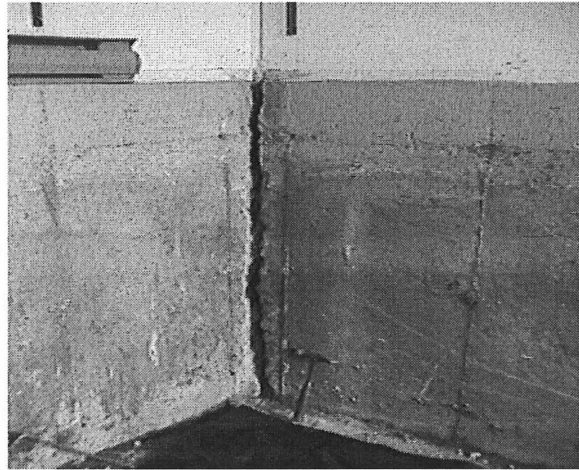
3<sup>e</sup> étape : l'amplitude du soulèvement *maximal* perceptible est mesurée selon le même procédé qu'au sous-sol. Par contre, la dalle du béton du garage possède une légère dénivellation vers le puisard généralement situé vers le centre. Cette dénivellation est prise en considération lors de la prise de mesure et n'est pas incluse dans l'amplitude du soulèvement mesuré.

4<sup>e</sup> étape : les murs de fondation entourant le garage sont inspectés de l'intérieur et de l'extérieur du garage. La même distinction est faite entre les fissures se trouvant aux coins des murs de fondation et celles se trouvant entre les coins. Les fissures aux coins des murs de fondation du garage sont majoritairement verticales le long de l'arête (voir figure 3.9). En effet, les poussées latérales du remblai sur les murs de fondation sont beaucoup plus élevées au garage qu'au sous-sol à cause de l'épaisseur plus importante du remblai. Les coins des murs de fondation subissent de grandes pressions résultant d'une concentration de contraintes. Il s'agit donc d'un endroit plus fragile. Les fissures verticales aux coins atteignent parfois facilement de 1 à 2 cm d'ouverture. Ceci est néfaste, car la pénétration de l'eau et du gel est favorisée.

En plus de noter la présence de fissures sur les murs de fondation, on note quel mur de fondation est fissuré. La position du mur de fondation fissuré est prise par rapport à la maison. Ainsi, on note si le mur de fondation qui est fissuré est celui à l'avant du garage, à l'arrière du garage ou sur l'un des deux côtés du garage. Les fissures observées sont aussi classées comme mineures, ou comme majeures, selon l'ouverture des lèvres de la fissure. Le déplacement d'une lèvre de la



fissure par rapport à l'autre est aussi noté et classé. On remarque aussi que des murs ont subi un basculement par rapport à leur position initiale. Il s'agit surtout du mur de côté extérieur. Ceci confirme que les poussées latérales provenant du remblai sont parfois très élevées (voir section 2.3 *Phénomène de gonflement*).



**Figure 3.9 Fissure en coin (garage en réparation)**

5<sup>e</sup> étape : on regarde si la porte de garage ferme bien car un gonflement de la dalle d'entrée ou un mouvement des murs de fondation pourrait empêcher le bon fonctionnement de la porte. On étudie aussi les pièces attenantes au garage ainsi que celles à l'étage supérieur (s'il y en a un) pour voir s'il y a des dommages. On demande aussi au propriétaire s'il lave la voiture dans le garage. L'apport d'eau et de savon (sulfates possibles) dans le remblai par l'intermédiaire des fissures pourrait augmenter les réactions se produisant dans le remblai. Aussi, on interroge le propriétaire à savoir s'il rentre la voiture dans le garage l'hiver car la fonte de neige contaminée avec du sel ou du calcium accélère la dégradation du béton à sa surface et dans les fissures. De plus, on prend note de la température à laquelle le garage est maintenu durant l'hiver si celui-ci est chauffé. Plus la différence thermique est grande entre le remblai et l'air ambiant dans le garage, plus les réactions se produisant dans le remblai seront importantes [BÉRUBÉ et coll. 1986].

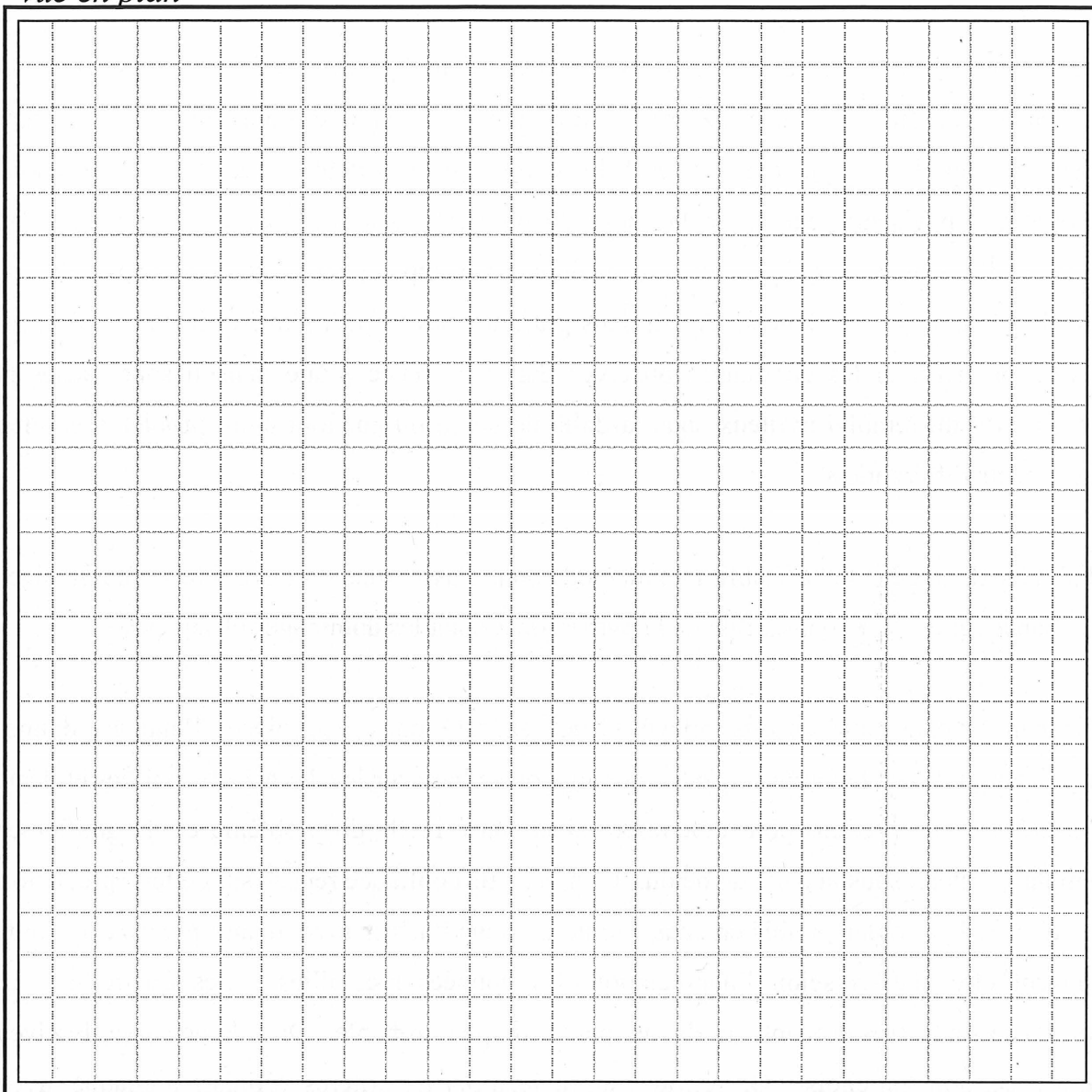
**6<sup>e</sup> étape** : on prend en note la configuration du système de gouttières entourant le garage ainsi que l'endroit où elles s'égouttent par rapport à la fondation (près ou loin). Finalement, on inscrit au rapport toutes les remarques pertinentes à l'étude en cours.

#### **3.2.4 Fiche : Croquis des désordres (sous-sol et garage)**

La quatrième partie du relevé visuel est le croquis des désordres au sous-sol et au garage. La figure 3.10 présente une vue en plan ainsi que la légende associée. La forme générale de la maison est tout d'abord dessinée. On y délimite bien les fondations du sous-sol et du garage avec des lignes doubles. Les parties de béton non-visibles sont hachurées dans chacune des pièces. Ensuite, le réseau de fissuration visible est reproduit le plus fidèlement possible à l'aide de lignes tiretées. Les points de soulèvement sont alors ajoutés à l'aide d'une croix (+). Si un sondage a été effectué, on l'indique avec un X encerclé. Les fissures dans les fondations sont représentées par un symbole d'éclair. On montre aussi les déplacements observés dans les murs de fondation par une flèche dans le sens du mouvement. L'emplacement du puisard est identifié à l'aide d'un rectangle. Finalement, on dessine les cloisons en faisant la distinction entre celles qui sont portantes et celles qui ne le sont pas. Au chapitre 6, *Maisons instrumentées*, les figures 6.6, 6.11, 6.16, 6.20 et 6.24 montrent des exemples de croquis des désordres provenant de cas instrumentés.



*vue en plan*



# **LÉGENDE**

- |     |                                  |   |   |
|-----|----------------------------------|---|---|
| =   | mur de fondation                 | ⊠ | secteur non visible (tapis, faux plancher, etc) |
| —   | cloison non portante             | ⊗ | sondage   |
| -•• | cloison portante                 | → | mouvement latéral probable perceptible          |
| --  | fissure sur la dalle de béton    | + | mouvement vertical probable perceptible         |
| ↗   | fissure dans le mur de fondation |   |   |

**Figure 3.10 Croquis des désordres (sous-sol et garage)**

(adaptation du protocole CTQ-M200)

### 3.3 Méthodologie de classement des données

Les relevés visuels, effectués dans les sous-sols et dans les garages des maisons sélectionnées, servent à recueillir les données nécessaires afin de déterminer si les dommages observés dans une pièce ou dans l'autre peuvent provenir du gonflement du remblai sous la dalle de béton. La détermination visuelle exacte de la cause du problème peut être rendue difficile soit par un manque d'information, qui peut être attribuable, par exemple, à un revêtement de plancher ou soit par des dommages très légers. Ainsi, dans plusieurs cas, il peut s'avérer laborieux d'établir un verdict à savoir si les dommages observés dans une pièce d'une maison sont causés par le gonflement du remblai pyriteux sous la dalle de béton ou par tout autre problème comme des tassements différentiels.

Il s'avère donc essentiel d'établir une méthode pour classer tous les cas étudiés selon le niveau de confiance relié à la responsabilité de la pyrite concernant les dommages observés.

Par conséquent, pour chaque relevé visuel exécuté dans une pièce, l'auteure donne une appréciation des observations. Cette appréciation se base sur les données recueillies et décide de l'utilité des observations pour déterminer si la cause réelle du problème est le gonflement du remblai pyriteux sous la dalle de béton. Le niveau de confiance repose sur cette appréciation afin d'établir si le remblai est mis en cause ou non. Dans l'affirmative, quatre niveaux de confiance peuvent être choisis selon l'appréciation des données recueillies. Ces quatre niveaux de confiance sont : très probable, probable, peut-être, peu probable. Dans la négative, le niveau de confiance, non, est choisi. On retrouve au tableau 3.4 les critères définissant chaque niveau de confiance.

Les critères qui appartiennent au plus haut niveau de confiance sont les symptômes les plus révélateurs d'un gonflement de remblai pyriteux sous une dalle de béton. Le *premier symptôme* d'un remblai pyriteux gonflant est le soulèvement ponctuel ou global de la dalle de béton sus-jacente. Un soulèvement entre 0 et 5 mm par mètre linéaire de dalle peut être trompeur, car, au garage, la dalle possède une légère dénivellation vers le puisard et qu'au sous-sol, la dalle de béton est un plancher sur sol qui n'est pas toujours parfaitement nivelée. C'est pourquoi, selon l'auteure, la dalle de béton se soulève réellement lorsque l'amplitude atteint 5 mm/m ou plus. Le

*deuxième symptôme* est la forme de la fissure. Le soulèvement doit se produire au niveau d'une fissure en étoile. Sinon, il pourrait être le résultat d'un autre phénomène comme le tassement différentiel. Dans ce cas, la dalle s'abaisse à l'endroit du tassement et semble «soulagée» à son autre extrémité par basculement. L'ouverture des fissures donne un indice de la force des poussées exercées sur la dalle par le remblai.

**TABLEAU 3.4 NIVEAU DE CONFIANCE (C.PEPIN 1999)**  
(LA PYRITE ETANT RESPONSABLE DES DOMMAGES OBSERVES)

Critères	Niveau de confiance				
	Très probable	Probable	Peut-être	Peu probable	Non
DALLE DE BETON:					
Soulèvement maximal	> 5 mm/m		0 < mm/m < 5		0 mm
Fissures en étoile	Plus de 5	3 à 5	1 ou 2		N/A
- Ouverture des fissures	Importante (entre 2 et 5 mm) à très importante (plus de 5 mm)		Faible (moins de 1 mm) à moyenne (entre 1 et 2 mm)	Faible (moins de 1 mm)	N/A
Poudre blanchâtre	Présente	Possible		Non	Non
Patron de fissure	Réseaux ramifiés ou polygonales		Fissures ponctuelles		N/A
GARAGE SEULEMENT:					
Mur de fondation fissuré	Très probable	Possible	Non		Non
- Ouverture des fissures	Importante (entre 2 et 5 mm) à très importante (plus de 5 mm)	Fine (moins de 1 mm) à moyenne (entre 1 et 2 mm)	N/A		N/A
- Déplacement relatif	Translation et rotation	Translation	N/A		N/A

Le *troisième symptôme* est la présence de poudre blanchâtre. En effet, les poussées exercées sur la dalle sont produites par la cristallisation de minéraux secondaires. Ces minéraux peuvent se déposer par évaporation à la surface de la dalle ou dans les fissures et au joint dalle-mur. Ils se présentent généralement sous forme de poudre blanchâtre. Le *quatrième symptôme*, le patron des fissures, peut aussi être révélateur. Lorsqu'il y a une multitude de fissures en étoile dans une même région de la dalle, les fissures se rejoignent pour former un réseau de fissures polygonales ou ramifiées.

Un autre critère important s'ajoute au garage. C'est l'état des murs de fondation entourant le garage. Le remblai du garage est souvent beaucoup plus épais que celui du sous-sol. Aussi, dans la plus part des cas, sa surface supérieure se retrouve à la surface du sol. Les poussées latérales du remblai exercées sur les murs de fondation le font fissurer verticalement. Dans les cas où la réaction est plus avancée, les murs de fondation subissent un déplacement de translation et parfois même de rotation ou de basculement.

Le niveau de confiance «très probable» fait mention de symptômes flagrants qui permettent d'affirmer que les dommages observés sont causés par un remblai pyriteux gonflant même si seul un examen pétrographique du remblai peut confirmer la présence de shales pyriteux gonflants. Pour des raisons économiques évidentes, il est impossible de réaliser un examen pétrographique du remblai dans chacune des pièces étudiées. Le niveau de confiance «probable» nous indique que le remblai est fort probablement pyriteux gonflant mais, un ou deux critères devrait être vérifiés. Le niveau de confiance «peut-être» correspond à un remblai pyriteux gonflant mais, certains critères sont absents. Le niveau de confiance «peu probable» correspond à des symptômes très légers. Il peut donc s'agir soit de symptômes trompeurs ou soit d'un remblai pyriteux en début de réaction. Le niveau de confiance «non» ne montre aucun signe de gonflement au moment de la visite. Par contre, il peut s'avérer que le remblai soit tout de même constitué de shale pyriteux gonflant mais que la réaction d'oxydation de la pyrite n'ait pas encore débutée car, toutes les conditions favorables ne sont pas encore réunies.

## 4 RÉSULTATS

### 4.1 Bâtiments résidentiels visités : généralités

La répartition des cas visités à l'intérieur des villes étudiées, soit Boucherville, Longueuil et St-Bruno, se retrouve au tableau 4.1.

**TABEAU 4.1 REPARTITION DES RELEVES VISUELS**

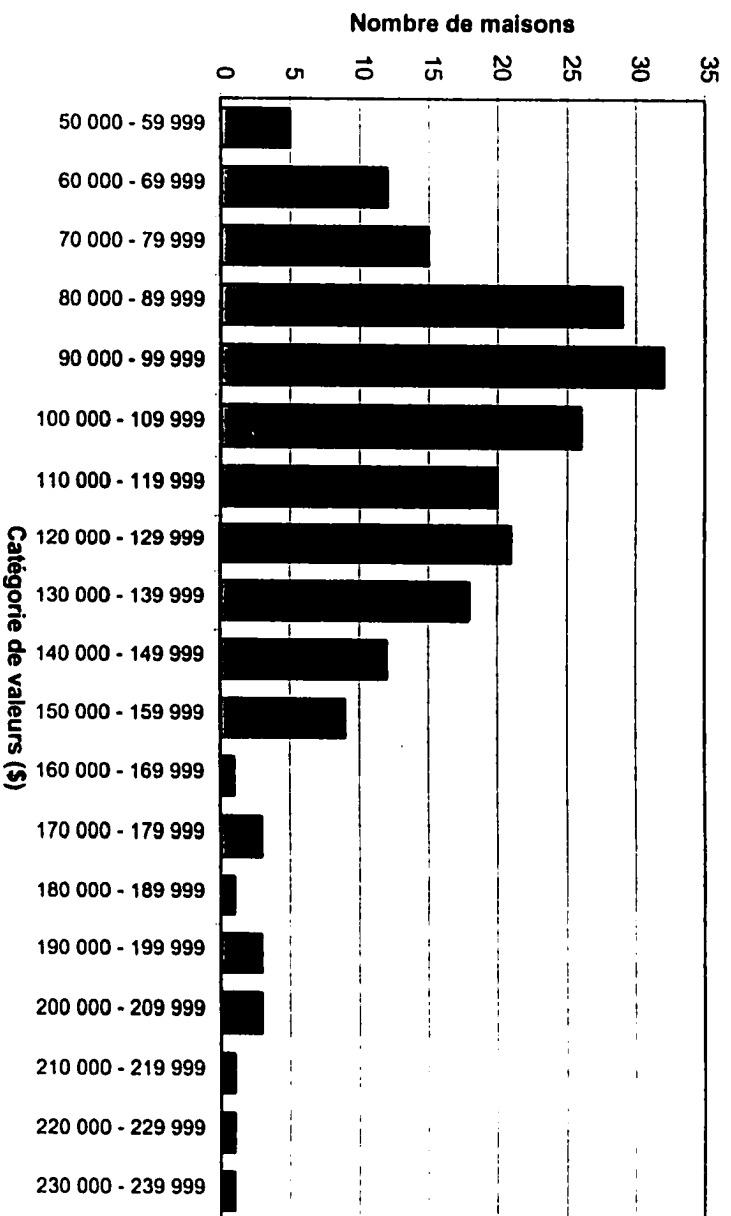
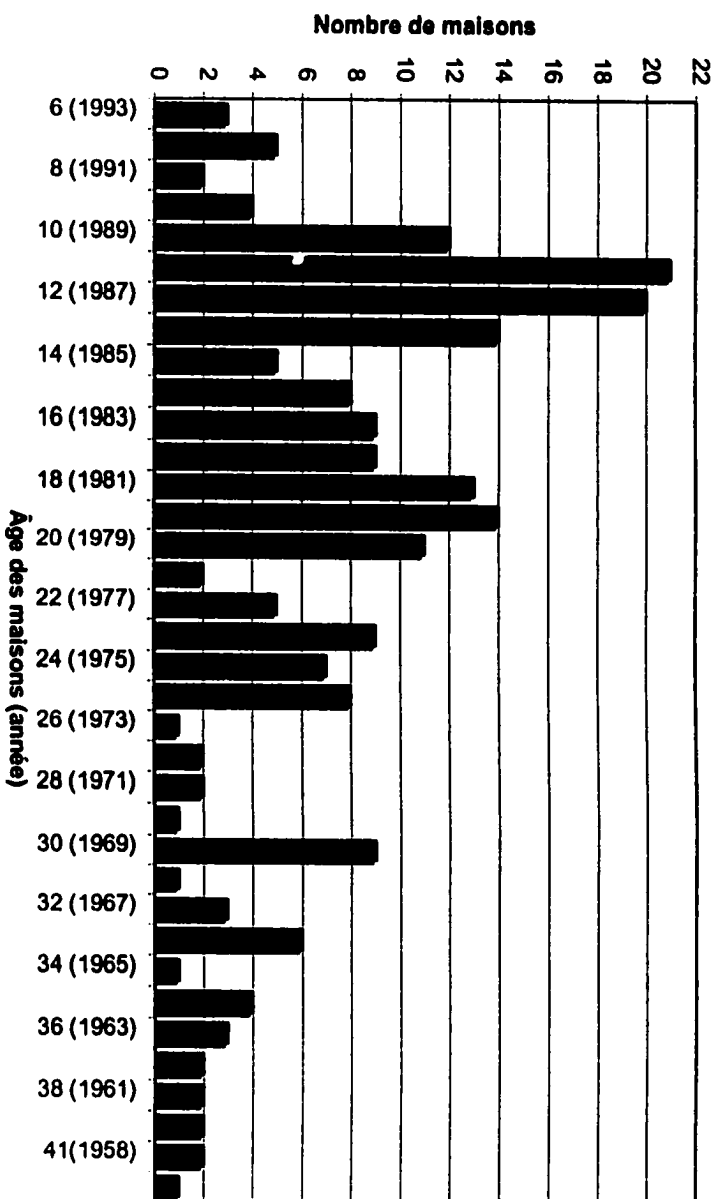
Ville	Nombre de cas visités		
	sous-sol	Garage	% de garage
Boucherville	86 (39%)	72 (36%)	84% (72/86)
Longueuil	41 (18%)	35 (18%)	85% (35/41)
St-Bruno	97 (43%)	90 (46%)	93% (90/97)
<b>Total</b>	<b>224 (100%)</b>	<b>197 (100%)</b>	<b>88% (197/224)</b>

Un grand total de 224 maisons a été visité dans l'ensemble des trois municipalités choisies. On compte donc 224 relevés visuels au sous-sol et 197 relevés visuels au garage. La municipalité qui a reçu le plus de visites est St-Bruno avec un total de 97 maisons. Il s'agit aussi de la ville où, parmi les maisons visitées, il y a le plus de maison avec garage, soit un ratio de 93% (90/97).

Dans l'ensemble des garages visités, il y a 182 garages simples et 15 garages doubles.

#### 4.1.1 Âge et valeur des résidences

L'âge des maisons visitées se situe entre 6 ans et 57 ans. La figure 4.1 présente la distribution de l'âge des maisons. On observe une tendance multi-modale correspondant aux pics de construction résidentielle au cours des décennies. Le dernier boom de construction s'est produit



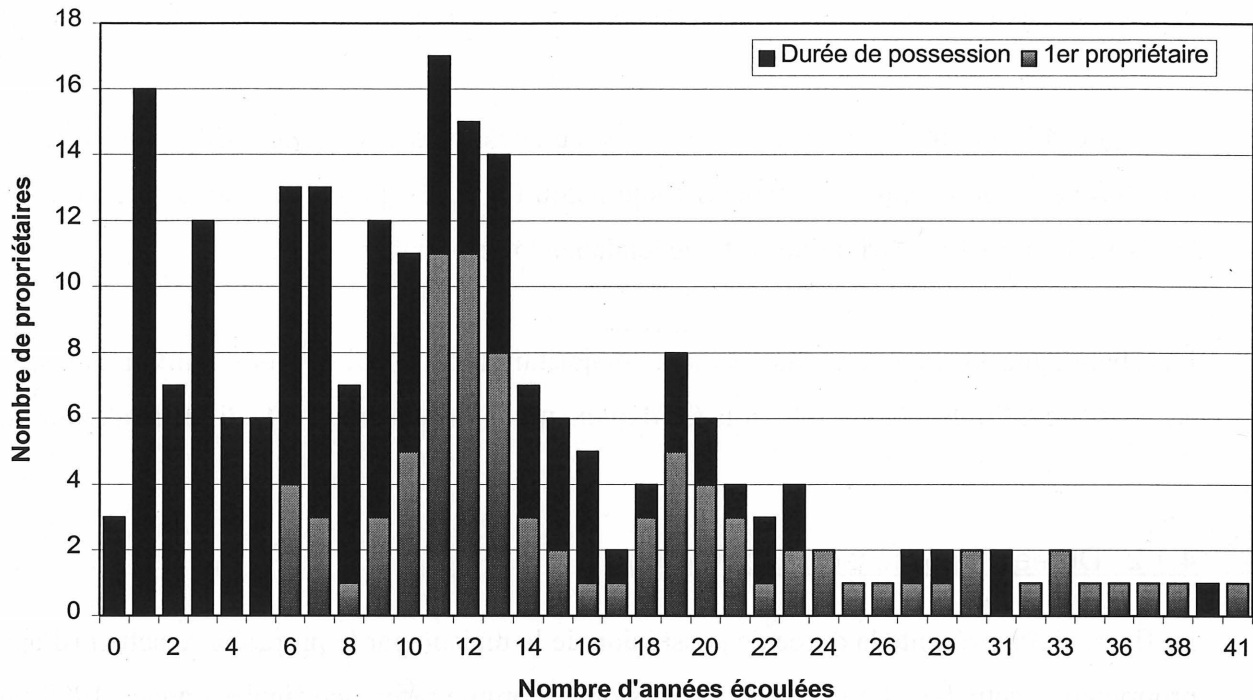
il y a environ une douzaine d'années. D'autres constructions massives de maisons se sont produites il y a un peu moins de 20 ans et de 25 ans.

La figure 4.2 montre la distribution de la valeur des maisons visitées. Elles sont classées par tranches de 10 000\$ partant à 50 000\$ jusqu'à 240 000\$. La pointe se trouve dans la tranche de 90 000-99 999\$. La distribution suit une tendance log-normale.

Les bâtiments résidentiels visités sont majoritairement des maisons unifamiliales, toutes catégories confondues, ainsi que trois (3) duplex, un (1) triplex et un (1) édifice à logements.

#### 4.1.2 Durée de possession des maisons

La figure 4.3 représente la durée de possession de la maison par le propriétaire actuel (d'après les propriétaires actuels). La durée de possession a, comme référence finale, l'année 1999 puisque l'investigation a été réalisée au cours de cette année. La durée de possession «0» signifie que le propriétaire actuel a fait l'acquisition de sa bâtisse au cours de l'année en cours soit 1999. Le graphique illustre aussi, pour chaque année de possession, combien de propriétaires actuels ont été les premiers (et seuls) propriétaires de la maison. Il est en effet intéressant de connaître cette donnée lorsque l'on s'intéresse à l'historique des dommages observés.



**Figure 4.3 Distribution de la durée de possession des bâtiments résidentiels par le propriétaire actuel, d'après les propriétaires actuels**

Aucun propriétaire visité n'a fait construire sa maison dans les dernières cinq années. Ainsi, les maisons visitées et âgées de 0 à 5 ans ont déjà été l'objet de transaction immobilière avec un « boom » il y a un an. Les deux pics à 11 ans et à 19 ans (plus faible) peuvent être expliqués à l'aide de la figure 4.1 : Distribution de l'âge des bâtiments résidentiels. En effet, on y retrouve les même deux pics. Beaucoup de maisons ont été construites dans ces deux périodes et plus des deux-tiers des propriétaires possèdent encore leur maison. Le propriétaire qui a la plus grande durée de possession détient sa maison depuis plus de 41 ans et en est le premier propriétaire.

#### 4.1.3 Types de revêtement des dalles de béton

Les principaux types de revêtement recouvrant les dalles de béton du sous-sol et du garage se retrouvent au tableau 4.2. On remarque qu'au sous-sol, trois types de revêtement dominant : le tapis, le plancher de bois et la peinture. Ensuite, on retrouve une combinaison de ces revêtements. Les sous-sols sans revêtement font partie d'une minorité. Par contre, les garages sans revêtement dominant, suivent des dalles de garage peinturées. Les données recueillies



constituent l'ensemble des relevés visuels où le type de revêtement a été noté. Il s'agit de 193 et 186 cas pour le sous-sol et le garage respectivement.

**TABLEAU 4.2 TYPES DE REVETEMENT DES DALLES DE BETON AU SOUS-SOL ET AU GARAGE**

Sous-sol		Garage	
Revêtement	Nbre	Revêtement	Nbre
Tapis	38	Aucun	101
Plancher de bois	32	Peinture	81
Peinture	29		
Plancher de bois et tapis	17		
Tapis et peinture	17		
Plancher de bois et peinture	15		
Aucun	14		
Total	162		182
% sur l'ensemble des données recueillies	84% (162/193)		98% (182/186)
% sur l'ensemble des relevés visuels	72% (163/224)		92% (182/197)

## 4.2 Classement des cas

Le cumul des manifestations observées dans les nombreux cas a permis d'établir les niveaux de relation entre la présence du gonflement et les autres dommages reliés à la présence de la pyrite.

### 4.2.1 Attribution des niveaux de confiance

Ainsi, les relevés visuels ont été classés selon les cinq niveaux de confiance prédéfinis à la section 3.3 : *Méthodologie de classement des données*. Les résultats sont classés par ville pour les deux pièces soit le sous-sol et le garage. Ils sont présentés aux tableaux 4.3 et 4.4.

**TABLEAU 4.3 CLASSEMENT DES SOUS-SOLS SELON LEUR NIVEAU DE CONFIANCE D'AVOIR UN PROBLEME ASSOCIE A UN REMBLAI PYRITEUX**

Ville	Niveau de confiance (la pyrite est responsable des dommages observés)					Total
	Très probable	Probable	Peut-être	Peu probable	Non	
Boucherville	23	10	9	4	40	86
Longueuil	9	2	3	2	25	41
St-Bruno	17	12	3	5	60	97
<b>Total</b>	<b>49</b>	<b>24</b>	<b>15</b>	<b>11</b>	<b>125</b>	<b>224</b>
<b>Pourcentage</b>	<b>22% (49/224)</b>	<b>11% (24/224)</b>	<b>7% (15/224)</b>	<b>5% (11/224)</b>	<b>56% (125/224)</b>	<b>100%</b>

**TABLEAU 4.4 CLASSEMENT DES GARAGES SELON LEUR NIVEAU DE CONFIANCE D'AVOIR UN PROBLEME ASSOCIE A UN REMBLAI PYRITEUX**

Ville	Niveau de confiance (la pyrite est responsable des dommages observés)					Total
	Très probable	Probable	Peut-être	Peu probable	Non	
Boucherville	38	14	7	4	9	72
Longueuil	20	6	3	1	5	35
St-Bruno	59	17	3	4	7	90
<b>Total</b>	<b>117</b>	<b>37</b>	<b>13</b>	<b>9</b>	<b>21</b>	<b>197</b>
<b>Pourcentage</b>	<b>59% (117/197)</b>	<b>19% (37/197)</b>	<b>7% (13/197)</b>	<b>5% (9/197)</b>	<b>11% (21/197)</b>	<b>100%</b>

Il y a 2 fois plus de cas de garages affectés par les problèmes de remblai pyriteux que de cas de sous-sols. Si l'on combine les résultats des niveaux de confiance «très probable » et «probable », il y a 154 cas problématiques de garages contre 73 cas de sous-sols.

Certains propriétaires sont aux prises avec une maison dont les deux pièces sont potentiellement affectées par des problèmes de remblais pyriteux. Si, pour l'interprétation des données, seules les pièces qui ont obtenu le niveau de confiance «très probable » ou «probable » sont considérées, on obtient, au tableau 4.5, le nombre de maisons, par villes, qui ont des dommages causés par un remblai pyriteux dans les deux pièces. À l'opposé, il y a les propriétaires qui craignent le phénomène de la pyrite, et qui croient en avoir chez eux sans justification observable basée sur des observations. On retrouve donc au même tableau le nombre de maisons qui n'ont aucun signe perceptible de désordres reliés à un remblai pyriteux mais qui ont été visitées en croyant qu'il y en avait.

**TABLEAU 4.5 NOMBRE DE MAISONS AYANT OU NON DES PROBLEMES DANS LES DEUX PIECES\***

Ville	Critère de classement		
	Très probable ou probable	Peu probable ou peut-être	Non
Boucherville	14	1	1
Longueuil	5	1	6
St-Bruno	19	1	2
<b>Total</b>	<b>38 (sur 197)</b>	<b>3</b>	<b>9</b>

\* garage et sous-sol

*Ainsi, d'après ces résultats, on pourrait penser qu'une maison sur cinq possédant un garage endommagé par la présence de pyrite a aussi des dommages associés au remblai pyriteux dans son sous-sol ! Et, selon nos observations, 9 propriétaires sur 224 ont cru avoir des dommages associés à la pyrite sans justification valable.*

#### 4.2.2 Détermination des types de problèmes

Les dommages observés lors des relevés visuels peuvent être le résultats de divers problèmes. Il est donc important de bien déterminer la ou les causes responsables des désordres notés. Lorsque l'on est en présence du soulèvement d'une dalle de béton, la source du problème peut être soit le gonflement du remblai et/ou la sulfatation de la dalle de béton. Lors de la réalisation des relevés visuels, des cas de sulfatation ont été notés. Ces conclusions ont été faites seulement sur l'observation visuelle des dommages. Aucun carottage et aucune analyse en laboratoire n'a été réalisés. Il est donc difficile d'établir si le soulèvement de la dalle de béton est produite par le gonflement du remblai ou par la sulfatation de la dalle de béton ou par une combinaison des deux phénomènes. Ainsi, l'analyse statistique réalisée dans cette étude ne différenciera pas les deux phénomènes. Par contre, il est possible d'affirmer que de la sulfatation a été observée, mais on ne peut pas dire si elle est entièrement reliée à l'oxydation de sulfures de fer présents dans le remblai sous la dalle de béton. Les tableaux 4.6 et 4.7 présentent la distribution des cas selon les villes ainsi que les types de phénomènes qui peuvent coexister avec les phénomènes de gonflement du remblai et de sulfatation de la dalle de béton.

**TABLEAU 4.6 DISTRIBUTION DES TYPES DE PROBLEMES DANS LES GARAGES**

Niveaux de confiance : Très probable et probable (117 + 37 cas)

Ville	Sulfatation/ Gonflement	Phénomène coexistant			Total
		Gel-dégel	Tassement/ affaissement	Autre	
Boucherville	52	3	3	0	6
Longueuil	26	2	2	0	4
St-Bruno	76	4	7	1	12
Total	154	9	12	1	22
Pourcentage	100%	6%	8%	1%	14%

Niveaux de confiance : peut-être et peu probable (13 + 9 cas)

Ville	Sulfatation/ Gonflement	Phénomène coexistant			Total
		Gel-dégel	Tassement/ affaissement	Autre	
Boucherville	11	3	1	0	4
Longueuil	4	0	1	1	2
St-Bruno	7	1	2	2	5
Total	22	4	4	3	11
Pourcentage	100%	18%	18%	14%	50%

**TABLEAU 4.7 DISTRIBUTION DES TYPE DE PROBLEMES DANS LES SOUS-SOLS**

Niveaux de confiance : Très probable et probable (49 + 24 cas)

Ville	Sulfatation/ Gonflement	Phénomène coexistant			Total
		Gel-dégel	Tassement/ affaissement	Autre	
Boucherville	33	0	1	0	1
Longueuil	11	0	0	0	0
St-Bruno	29	0	3	0	3
Total	73	0	4	0	4
Pourcentage	100%	0%	5%	0%	5%

Niveaux de confiance : peut-être et peu probable (15 + 11 cas)

Ville	Sulfatation/ Gonflement	Phénomène coexistant			Total
		Gel-dégel	Tassement/ affaissement	Autre	
Boucherville	13	0	1	0	1
Longueuil	5	0	1	0	1
St-Bruno	8	0	0	0	0
Total	26	0	2	0	2
Pourcentage	100%	0%	8%	0%	8%

**C'est au garage que l'on retrouve le plus de phénomènes coexistants, comme le gel-dégel, comparativement au sous-sol avec 14% des cas contre 5%.**



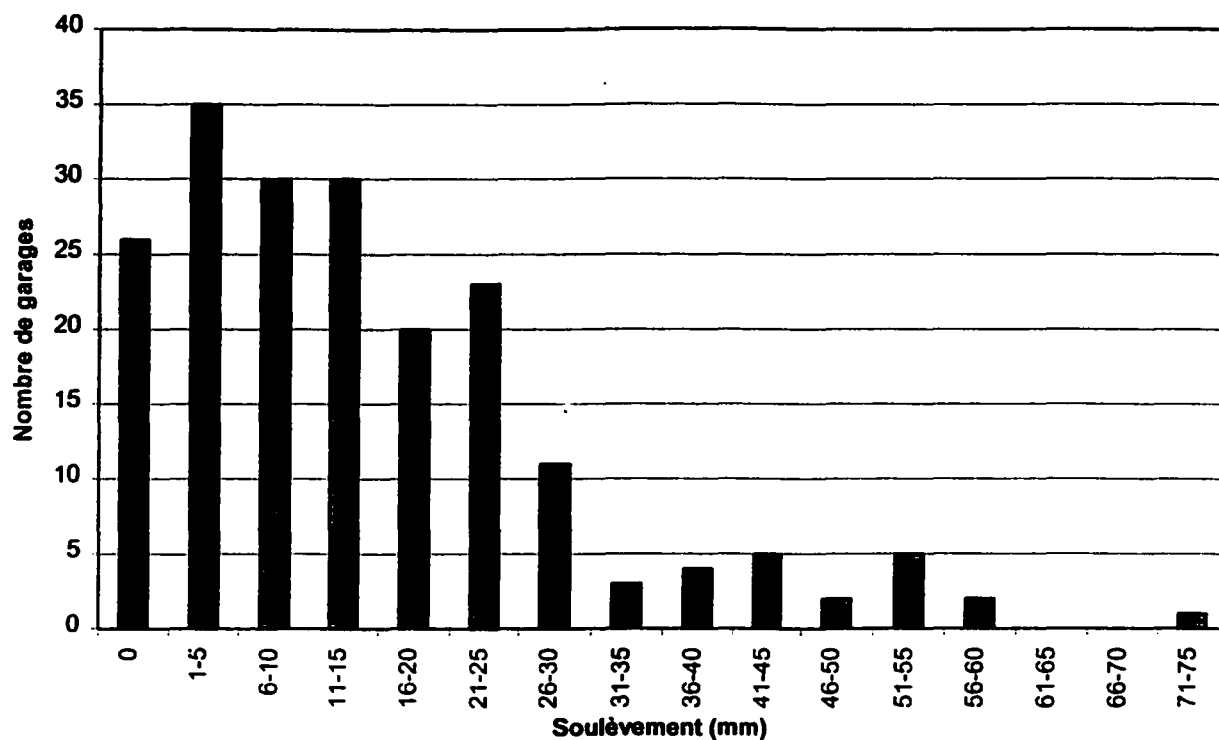
## 5 ANALYSE DES DONNÉES ET INTERPRÉTATION

### 5.1 Principaux symptômes

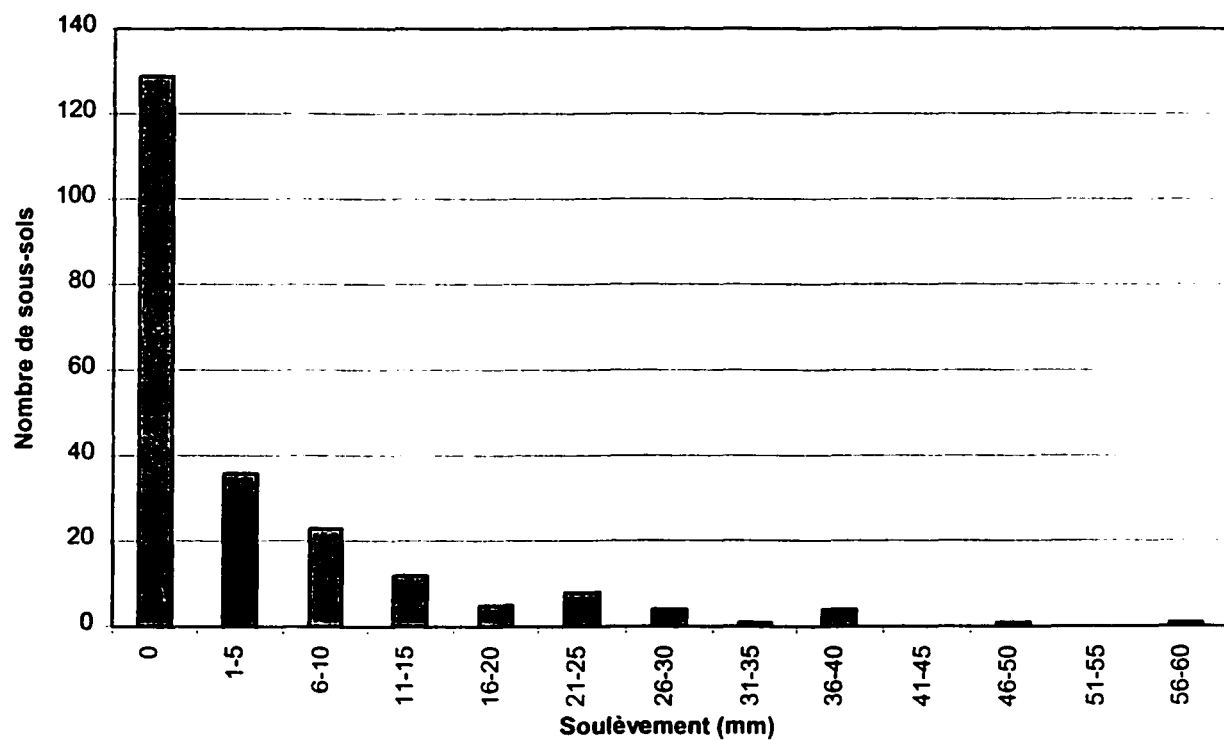
Les dommages causés par le gonflement de remblais pyriteux se manifestent par des indices distinctifs de la réaction en cours. Les signes les plus révélateurs sont : les soulèvements maximaux ponctuels de la dalle, les fissures dans les murs de fondations avec déplacement latéral, la présence de fissures en étoile ainsi que la présence de poudre blanchâtre. Il est à noter que les deux derniers symptômes peuvent être présents sans qu'il ne s'agisse d'un cas de remblais pyriteux. Ces symptômes vont être étudiés un à un en commençant par les soulèvements. *Il est important de noter qu'il est préférable de ne pas extrapoler les données recueillies en dehors des municipalités étudiées soient Longueuil, Boucherville et Saint-Bruno-de-Montarville à cette étape de l'avancement des connaissances sur ce sujet.*

#### 5.1.1 Soulèvements ponctuels

Les mesures des soulèvements maximaux prises au garage et au sous-sol lors des relevés visuels sont présentées sous forme d'histogrammes aux figures 5.1 et 5.2. Les soulèvements sont regroupés par catégories de 5 mm à l'exception de la première catégorie qui est un soulèvement nul. Les mesures des soulèvements sont précis au millimètre près. En ordonnée, on retrouve le nombre de garages ou de sous-sols affectés par les soulèvements de chaque groupe.



**Figure 5.1 Distribution des soulèvements mesurés dans les garages**



**Figure 5.2 Distribution des soulèvements mesurés dans les sous-sols**



Les soulèvements nuls proviennent des pièces qui ont été déclarées non affectées par un problème de remblai pyriteux. Au garage, on retrouve, pour les cas inventoriés, un soulèvement maximal de 75 mm. La majorité des soulèvements se situent cependant entre 1 et 30 mm. Au sous-sol, le soulèvement maximal observé est de 58 mm. L'intervalle de 1 à 15 mm constitue la zone où il y a le plus grand nombre de soulèvements. Ainsi, l'amplitude maximale des soulèvements au garage est deux fois plus importante qu'au sous-sol. Il ne faut toutefois pas oublier que pour une même pièce, il peut exister une vaste gamme de soulèvements entre le soulèvement nul et le soulèvement maximal mesuré. Lors de la mesure des soulèvements, aucune distinction n'a été faite entre les soulèvements causés par la sulfatation et les soulèvements causés par le gonflement.

### 5.1.2 Types de fissures

Lors des relevés visuels, les fissures ont été classées selon leur forme : longitudinale ou en étoile. On retrouve aussi une distinction pour les microfissures et les fissures de retrait. Les tableaux 5.1 et 5.2 présentent les résultats pour les garages et les sous-sols. Le total représente, en ordre décroissant, le nombre de maison présentant un type de fissures ou une combinaison de types de fissures.

**TABLEAU 5.1 TYPES DE FISSURES AU GARAGE**

Niveaux de confiance : très probable et probable (117 + 37 cas)

Type de fissure	Fissure(s) observée(s)								Nombre de cas
Plusieurs fissures longitudinales		x					x	x	33
1 ou 2 fissures longitudinales			x	x	x				29
Plusieurs fissures en étoile	x	x		x					119
1 ou 2 fissures en étoile			x			x		x	22
Nombre de cas (sur 154 cas)	84	26	11	9	9	8	4	3	

Niveaux de confiance : peut-être et peu probable (13 + 9 cas)

Type de fissure	Fissure(s) observée(s)								Nombre de cas
Plusieurs fissures longitudinales					x				1
1 ou 2 fissures longitudinales	x		x	x					12
Plusieurs fissures en étoile		x			x				7
1 ou 2 fissures en étoile			x			x			4
Microfissures				x			x		3
Nombre de cas (sur 22 cas)	7	6	3	2	1	1	1	1	-

**TABLEAU 5.2 TYPES DE FISSURES AU SOUS-SOL**

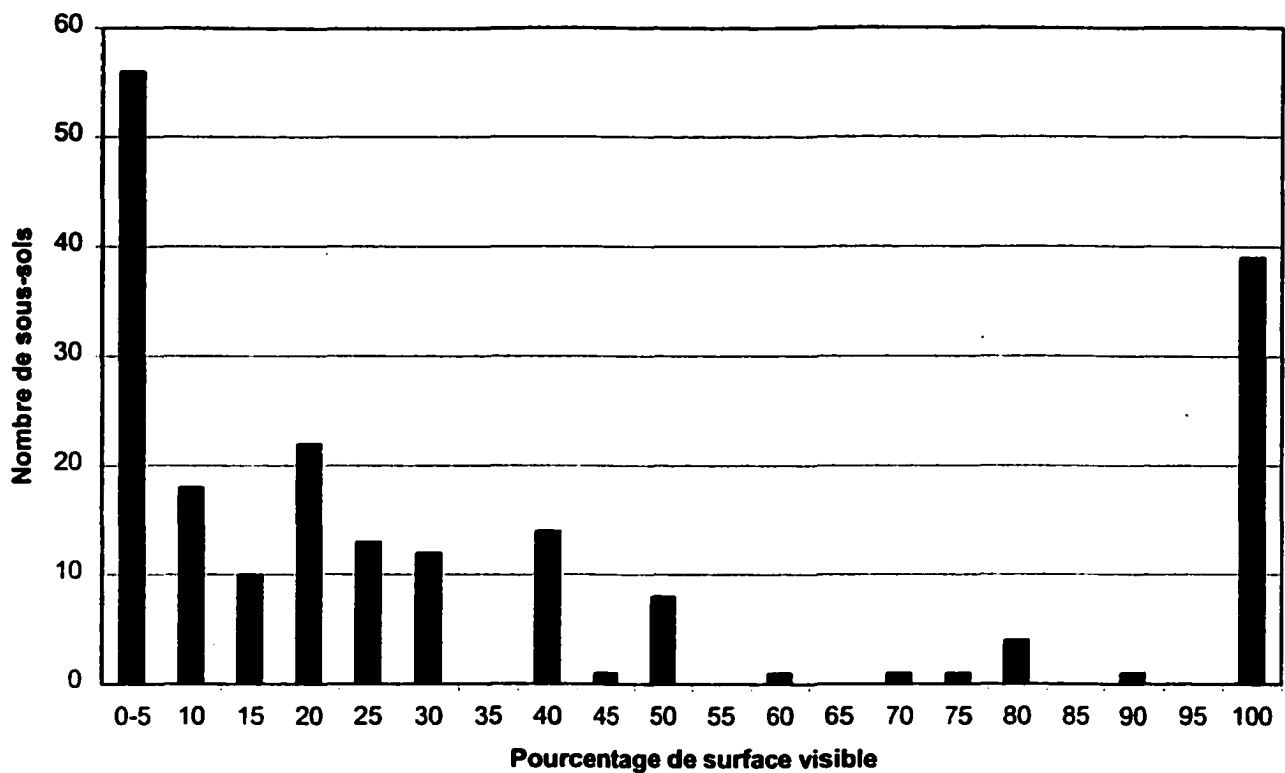
Niveaux de confiance : très probable et probable (49 + 24 cas)

Type de fissure	Fissure(s) observée(s)											Total	
Plusieurs fissures longitudinales			x			x						9	
1 ou 2 fissures longitudinales				x	x				x	x		14	
Plusieurs fissures en étoile	x		x						x		x	45	
1 ou 2 fissures en étoile		x		x								14	
Microfissures											x	x	2
Fissures de retrait										x			1
Aucune fissures							x						2
Total (sur 73 cas)	36	8	7	6	6	2	2	2	1	1	1	1	

Niveaux de confiance : peut-être et peu probable (15 + 11 cas)

Type de fissure	Fissure(s) observée(s)							Total
1 ou 2 fissures longitudinales			x					4
Plusieurs fissures en étoile				x				4
1 ou 2 fissures en étoile					x			4
Microfissures	x						x	6
Fissures de retrait							x	1
Aucune fissures						x		3
<b>Total (sur 26 cas)</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	

Les fissures en forme d'étoile dominent dans les deux situation, garages et sous-sols. On retrouve aussi un grand nombre de fissures longitudinales seules ou en combinaison avec les fissures en étoile. Au sous-sol, le peu de surface visible (moins de 30% de la surface dans 50% des cas) rend l'interprétation plus difficile (voir figure 5.3). Au lieu de voir une fissure en étoile, on peut voir seulement une de ses branches et la classer dans les fissures longitudinales. Par contre, il est quand même possible de ressentir des soulèvements un peu partout à travers le revêtement de sol et observer d'autres symptômes pouvant aider à conclure à la présence possible d'un remblai pyriteux. Toujours au tableau 5.2, lorsqu'aucune fissure n'est visible ou tout simplement qu'aucune classe n'est cochée, il se peut qu'il y ait beaucoup de sulfatation qui ait détérioré la dalle sans la faire fissurer ou bien que la dalle de béton ait été réparée partiellement ou en totalité. Ceci explique pourquoi ces cas ont été classés avec un niveau de confiance «très probable » ou «probable » sans avoir nécessairement de fissures apparentes.



**Figure 5.3 Pourcentage de surface visible au sous-sol**

### 5.1.3 Ouverture des fissures

L'ouverture des fissures est mesurée en mm perpendiculairement aux lèvres. Elles ont été classées en quatre catégories : fine, moyenne, importante et très importante. Les fissures de certaines pièces ont été colmatées par les propriétaires. On retrouve les résultats pour les fissures du garage et du sous-sol aux tableaux 5.3 et 5.4 respectivement.

**TABLEAU 5.3 OUVERTURE ET COLMATAGE DES FISSURES AU GARAGE**

Niveaux de confiance : très probable et probable (117 + 37 cas)

Ouverture des fissures	Nombre	Pourcentage	Colmatée	Refissurée	Colm. et ref.
Fine: moins de 1 mm	5	3%	2	2	100%
Moyenne: entre 1 et 2 mm	18	12%	5	2	40%
Importante: entre 2 et 5 mm	52	34%	12	5	42%
Très importante: plus de 5 mm	71	46%	17	9	53%
Non mentionnée	8	5%	6	1	17%
<b>Total</b>	<b>154</b>	<b>100%</b>	<b>42</b>	<b>19</b>	<b>45%</b>

Niveaux de confiance : peut-être et peu probable (13 + 9 cas)

Ouverture des fissures	Nombre	Pourcentage	Colmatée	Refissurée	Colm. et ref.
Fine: moins de 1 mm	2	9%	0	0	-
Moyenne: entre 1 et 2 mm	10	45%	0	0	-
Importante: entre 2 et 5 mm	7	32%	1	0	0%
Très importante: plus de 5 mm	3	14%	0	0	-
Non mentionnée	0	0%	0	0	-
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>100%</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>

**TABLEAU 5.4 OUVERTURE ET COLMATAGE DES FISSURES AU SOUS-SOL**

Niveaux de confiance : très probable et probable (49 + 24 cas)

Ouverture des fissures	Nombre	Pourcentage	Colmatée	Refissurée	Colm. et ref.
Fine: moins de 1 mm	6	8%	1	0	0%
Moyenne: entre 1 et 2 mm	16	22%	1	1	100%
Importante: entre 2 et 5 mm	24	33%	2	0	0%
Très importante: plus de 5 mm	18	25%	1	1	100%
Non mentionnée	9	12%	3	0	0%
<b>Total</b>	<b>73</b>	<b>100%</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>25%</b>

Niveaux de confiance : peut-être et peu probable (15 + 11 cas)

Ouverture des fissures	Nombre	Pourcentage	Colmatée	Refissurée	Colm. et ref.
Fine: moins de 1 mm	6	23%	0	0	-
Moyenne: entre 1 et 2 mm	8	31%	1	0	0%
Importante: entre 2 et 5 mm	2	8%	0	0	-
Très importante: plus de 5 mm	1	4%	0	0	-
Non mentionnée	9	35%	0	0	-
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>100%</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>

L'ouverture des fissures est beaucoup plus importante au garage qu'au sous-sol, ce qui est normal puisque les dommages y sont plus importants. On retrouve aussi beaucoup plus de fissures

colmatées au garage. On remarque aussi qu'un peu moins de la moitié des fissures colmatées au garage ont refissurée.

#### 5.1.4 Poudre blanchâtre

La quantité de poudre blanchâtre (gypse, ettringite, jarosite) que l'on retrouve au niveau des fissures et au niveau des joints dalle-mur est un autre indice de remblai pyriteux. Les tableaux 5.5 et 5.6 comparent la quantité de poudre blanchâtre présente au niveau des fissures avec celle présente au niveau des joints au garage et au sous-sol des maisons visitées.

**TABLEAU 5.5 QUANTITE DE POUDRE BLANCHATRE AUX FISSURES ET AUX JOINTS DU GARAGE**

<b>Poudre blanchâtre au niveau des fissures</b>	Niveau de confiance : très probable et probable (117 + 37 cas) <b>Poudre blanchâtre aux joints dalle-mur</b>				Niveau de confiance : peut-être et peu probable (13 + 9 cas) <b>Poudre blanchâtre aux joints dalle-mur</b>			
	Aucune	Rare	Intermédiaire	Abondante	Aucune	Rare	Intermédiaire	Abondante
Aucune	50	8	6	4	8	1	2	1
Rare	26	21	5	1	3	4	1	0
Intermédiaire	12	0	7	4	1	0	1	0
Abondante	4	0	2	4	0	0	0	0

**TABLEAU 5.6 QUANTITE DE POUDRE BLANCHATRE AUX FISSURES ET AUX JOINTS DU SOUS-SOL**

<b>Poudre blanchâtre au niveau des fissures</b>	Niveau de confiance : très probable et probable (49 + 24 cas) <b>Poudre blanchâtre aux joints dalle-mur</b>				Niveau de confiance : peut-être et peu probable (15 + 11 cas) <b>Poudre blanchâtre aux joints dalle-mur</b>			
	Aucune	Rare	Intermédiaire	Abondante	Aucune	Rare	Intermédiaire	Abondante
Aucune	26	4	1	2	21	1	0	1
Rare	11	3	2	0	1	0	1	0
Intermédiaire	8	0	0	2	0	0	0	1
Abondante	8	1	3	2	0	0	0	0

La poudre blanchâtre peut être un indice révélateur lorsqu'on la retrouve en grande quantité. Par contre, elle n'a pas souvent été retrouvée en abondance dans les endroits visités. Et même dans la grande majorité des cas, il n'y avait aucune trace observable, ni dans les fissures, ni dans les joints dalle-mur. Plus le niveau de confiance devient faible, plus la quantité de poudre blanchâtre

observée diminue, ce qui est tout à fait logique. Il ne faut pas oublier que la quantité de poudre blanchâtre produite est difficilement quantifiable puisque les propriétaires utilisent les pièces étudiées quotidiennement et la dispersent ou l'enlèvent en faisant le ménage. Il est donc difficile de conclure de manière définitive sur ce point.

#### **5.1.5 Fissures des murs de fondation**

Les fissures dans les murs de fondation sont un autre des symptômes les plus révélateurs. Les murs de fondation entourant le garage et entourant le sous-sol ont été observés. Les fissures dans les murs de fondations entourant le sous-sol ont été notées comme dans le cas du garage. Par contre, il est difficile de pouvoir relier ces fissures à la présence de remblai pyriteux au sous-sol. En effet, la faible épaisseur de remblai au sous-sol ne peut expliquer la fissuration des murs de fondation contrairement au garage où le remblai est plus épais. Ainsi, les fissures observées dans les murs de fondation entourant les sous-sols ne sont pas considérées dans cette étude.

Pour chacun des garages étudiés, on distingue les fissures situées aux coins et les fissures situées entre les coins des murs de fondations. Les fissures ont été classées ou bien mineure ou bien majeure selon l'ouverture des lèvres de la fissure (mineure < 2 mm < majeure). On trouve les résultats au tableau 5.7.

**TABLEAU 5.7 NOMBRE DE CAS DE FISSURES DANS LES MURS DE FONDATION DU GARAGE**

<b>Fissures aux coins</b>	<b>Niveau de confiance : très probable et probable (117 + 37 cas)</b>			<b>Niveau de confiance : peut-être et peu probable (13 + 9 cas)</b>		
	<b>Fissures entre les coins</b>			<b>Fissures entre les coins</b>		
	Aucune	Mineure(s)	Majeure(s)	Aucune	Mineure(s)	Majeure(s)
Aucune	22	20	19	7	4	2
Mineure(s)	13	13	11	4	2	0
Majeure(s)	26	20	10	1	1	1

Les fissures présentes dans les murs de fondation du garage sont souvent classées comme majeure. De plus, la fréquence de la fissuration augmente avec le degré de certitude.

Lors des relevés visuels, le niveau de déplacement latéral des fissures dans les murs de fondation a aussi été noté. Au garage seulement, on a également relevé la position du mur de fondation fissuré (mur de côté, de l'avant ou de l'arrière) d'après les croquis des relevés visuels. La colonne N/A contient les fissures dont l'emplacement n'a pas été noté. Le tableau 5.8 présente donc l'amplitude des déplacements latéraux des lèvres des fissures des murs de fondation du garage en fonction de leur emplacement.

**TABLEAU 5.8 IDENTIFICATION DU MUR DE FONDATION AFFECTE PAR LA FISSURATION AU GARAGE**

Niveaux de confiance : très probable et probable (117 + 37 cas)

Déplacement latéral	Mur affecté								Total
	Avant	Côté	Arrière	N/A	Av+Côté	Av+Arr.	Côté+Arr.	Les 3	
Aucun déplacement perceptible	0	0	0	29	0	0	0	0	29
Faible: moins de 1 mm	0	7	0	2	0	1	0	0	10
Moyen: entre 1 et 2 mm	0	19	1	1	2	0	6	0	29
Important: entre 2 et 5 mm	3	20	1	3	3	1	5	1	37
Très important: plus de 5 mm	3	8	1	2	5	1	2	1	23
N/A	-	-	-	4	-	-	-	-	4
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>54</b>	<b>3</b>	<b>41</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>2</b>	<b>132*</b>

\* Le total de 132 ne correspond pas à la totalité des cas très probable et probable (117 + 37), car 22 cas parmi eux n'ont pas de fissure dans les murs de fondation.

Niveaux de confiance : peut-être et peu probable (13 + 9 cas)

Déplacement latéral	Mur affecté								Total
	Avant	Côté	Arrière	N/A	Av+Côté	Av+Arr.	Côté+Arr.	Les 3	
Aucun déplacement perceptible	0	0	0	7	0	0	0	0	7
Faible: moins de 1 mm	0	2	0	0	0	0	0	0	2
Moyen: entre 1 et 2 mm	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Important: entre 2 et 5 mm	0	3	0	0	0	0	0	0	3
Très important: plus de 5 mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N/A	-	-	-	2	-	-	-	-	2
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>15*</b>

\* Le total de 15 ne correspond pas à la totalité des cas très probable et probable (13 + 9), car 7 cas parmi eux n'ont pas de fissure dans les murs de fondation.

Les fissures se situent majoritairement sur le mur de fondation du côté extérieur du garage. L'ensemble des fissures est assez bien réparti dans les cinq niveaux de déplacement. Toutefois, le plus grand nombre de déplacements se situe à un niveau important soit entre 2 et 5 mm.

Il est aussi possible de comparer l'importance des fissures aux coins et entre les coins avec le niveau de déplacement latéral mesuré. Le tableau 5.9 présente les données recueillies.

**TABEAU 5.9 DÉPLACEMENT LATÉRAL AU NIVEAU DES FISSURES DES MURS DE FONDATION AU GARAGE**

Niveaux de confiance : très probable et probable (117 + 37 cas)

Fissures		Déplacement latéral						Total
Aux coins	Entre les coins	Aucun	Faible	Moyen	Important	Très important	N/A	
Aucune	Mineure(s)	10	4	2	2	2	0	20
	Majeure(s)	3	0	4	9	2	1	19
Mineure(s)	Aucune	6	1	3	1	0	1	12
	Mineure(s)	4	1	5	1	2	0	13
	Majeure(s)	1	0	5	2	2	1	11
	N/A	1	0	0	0	0	0	1
Majeure(s)	Aucune	3	0	3	10	7	1	24
	Mineure(s)	1	4	3	7	5	0	20
	Majeure(s)	0	0	3	5	2	0	10
	N/A	0	0	1	0	1	0	2
<b>Total</b>		<b>29</b>	<b>10</b>	<b>29</b>	<b>37</b>	<b>23</b>	<b>4</b>	<b>132*</b>

\* Le total de 132 ne correspond pas à la totalité des cas très probable et probable (117 + 37), car 22 cas parmi eux n'ont pas de fissure dans les murs de fondation.

Niveaux de confiance : peut-être et peu probable (13 + 9 cas)

Fissures		Déplacement latéral						Total
Aux coins	Entre les coins	Aucun	Faible	Moyen	Important	Très important	N/A	
Aucune	Mineure(s)	1	2	0	0	0	1	4
	Majeure(s)	1	0	0	1	0	0	2
Mineure(s)	Aucune	3	0	1	0	0	0	4
	Mineure(s)	1	0	0	0	0	1	2
	Majeure(s)	0	0	0	0	0	0	0
Majeure(s)	Aucune	0	0	0	1	0	0	1
	Mineure(s)	1	0	0	0	0	0	1
	Majeure(s)	0	0	0	1	0	0	1
<b>Total</b>		<b>7</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>15*</b>

\* Le total de 15 ne correspond pas à la totalité des cas très probable et probable (13 + 9), car 7 cas parmi eux n'ont pas de fissure dans les murs de fondation.

Il est très difficile de faire ressortir une tendance de ces tableaux. Seule la partie supérieure du tableau des déplacements latéraux au garage nous donne une meilleure vue d'ensemble à cause



de la plus grande quantité de données recueillies. La partie inférieure du tableau comporte moins de données (15 contre 132) et ne contient aucune fissure à déplacement très important.

On serait porté à croire que plus l'ouverture de la fissure est petite, moins les déplacements latéraux sont importants et vice versa. Ceci n'est pas totalement vrai. On remarque plusieurs fissures mineures à grand déplacement latéral ainsi que plusieurs fissures majeures à petits déplacements latéraux ou déplacements nuls. Ainsi, l'ouverture des fissures et le déplacement des lèvres semblent indépendants l'un de l'autre. Par conséquent, il est difficile d'établir une relation directe entre l'ouverture et le déplacement latéral d'une fissure. Il se peut que des phénomènes de tassement interviennent et compliquent l'analyse.

## **5.2 Observations spécifiques aux garages**

Pour l'ensemble des garages, des points particuliers ont été observés et notés.

### **5.2.1 État des façades des garages**

Tout d'abord, il y a l'état de fonctionnement des portes de garage. Celui-ci est relié au nombre de fissures dans la dalle d'entrée du garage ainsi qu'à l'état du pilier central des garages doubles. Les tableaux 5.10 et 5.11 présentent les résultats pour les garages simples et les garages doubles respectivement. Dans le tableau, N/A signifie que le nombre de fissures dans la dalle d'entrée n'a pas été noté.

**TABEAU 5.10 FAÇADE DES GARAGES SIMPLES**

Fonctionnement des portes de garage	Nombre de fissures dans la dalle d'entrée	Nombre de garages
La porte ferme mal	N/A	2
	0	2
	1	16
	2	8
	3	4
La porte ferme bien	N/A	14
	0	27
	1	67
	2	27
	3	4
Total		171

**TABEAU 5.11 FAÇADE DES GARAGES DOUBLES**

Fonctionnement des portes de garage	Nombre de fissures dans la dalle d'entrée	Nbre de garages dont le pilier central est		
		Fissuré	Non fissuré	N/A**
Ne ferment plus	2	1		
Se ferment mal	2	1		
	3		1	
Se ferment bien	N/A*		2	
	0		1	
	1		1	1
	2	1	1	
	3	1	1	
Total :		4	7	1

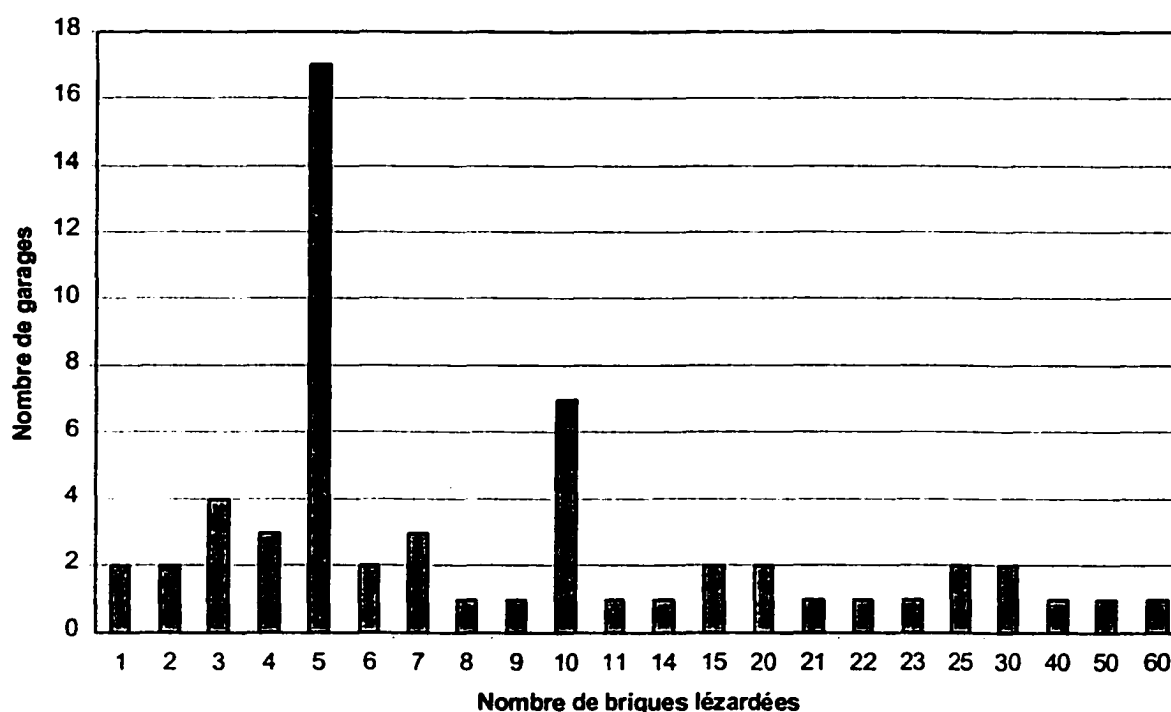
\* N/A signifie que le nombre de fissures dans la dalle d'entrée n'a pas été noté.

\*\* N/A signifie que l'état du pilier central n'a pas été noté.

Il est intéressant de remarquer que l'état de fonctionnement de la porte de garage (à savoir si elle se ferme bien et de façon étanche ou non) n'est pas directement relié au nombre de fissures dans la dalle d'entrée comme il aurait été possible de croire. En effet, lorsque la porte de garage est fermée, elle repose sur la dalle d'entrée. Si cette dalle est fissurée, elle a plus de chance de présenter une différence de niveau entre deux points ou entre deux lèvres d'une même fissure. Il semble qu'ici, ce ne soit pas le cas. Il y aurait donc d'autres facteurs en jeu comme l'entrée du gel. Le gel peut élargir une microfissure et aussi provoquer un soulèvement à l'occasions.

### 5.2.2 Briques lézardées au garage (mur extérieur)

Le plus grand nombre de briques lézardées sur un mur de garage, mur avant, arrière ou de côté, a aussi été noté. Sur l'ensemble des garages (197), il y a 58 garages qui présentent des briques lézardées. La distribution du nombre de briques lézardées est présentée à la figure 5.4. Les cas ayant un niveau de confiance «non » n'ont pas été considérés dans la compilation des données.



**Figure 5.4 Distribution du nombre de briques lézardées au garage**

La distribution s'étale de 1 à 60 briques lézardées. Sur l'ensemble des 58 garages possédant des briques lézardées, 52 ont un niveau de confiance « très probable » ou « probable ». Ainsi, la présence de briques lézardées peut être reliée à un remblai gonflant. Une lézarde typique consiste en la continuation d'une fissure du mur de fondation dans le mur de briques. Par contre, il ne faut pas oublier que les lézardes dans les briques peuvent être causées par d'autres phénomènes comme les tassements différentiels ou peuvent se retrouver à des endroits de faiblesse comme aux extrémités du linteau de la porte de garage. Effectivement, le linteau peut subir de la flexion

sous l'effet des pressions en son centre. Il serait donc important de noter l'endroit où se retrouvent ces lézardes, de quelle façon elles se présentent ainsi que les causes possibles à leur formation.

### **5.2.3 Utilisation du garage**

L'utilisation du garage par le propriétaire actuel a été notée. Il s'agissait de savoir s'il utilisait son garage pour laver sa voiture dans le garage. Dans l'affirmative, une appréciation de la fréquence de lavage a aussi été prise en compte. Le tableau 5.12 compile les résultats selon le niveau de confiance.

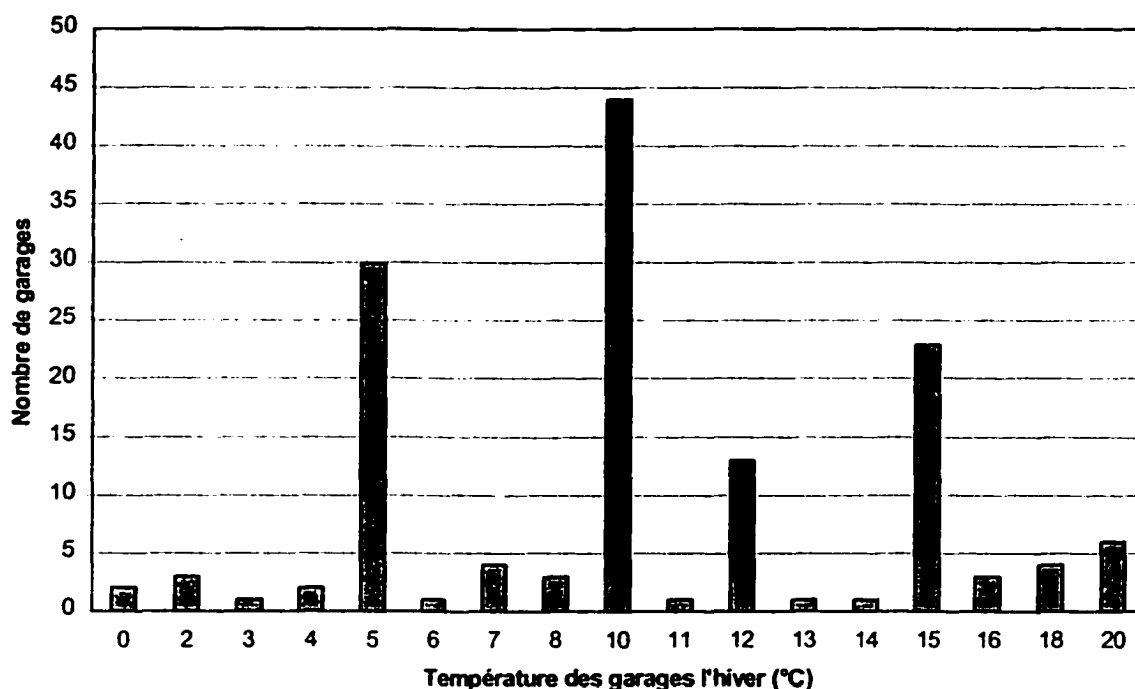
**TABLEAU 5.12 FREQUENCE DE LAVAGE DE LA VOITURE DANS LE GARAGE**

<b>Fréquence de lavage</b>	<b>Niv. de confiance : Très probable et probable Nombre de cas</b>	<b>Pourcentage</b>	<b>Niv. de confiance : peut-être et peu probable Nombre de cas</b>	<b>Pourcentage</b>
N/A	10	6%	0	0%
Fréquent	17	11%	2	9%
Rare	20	13%	3	14%
Jamais	107	70%	17	77%
<b>Total</b>	<b>154</b>	<b>100%</b>	<b>22</b>	<b>100%</b>

Il est difficile de relier les cas où il y a des dommages attribués aux remblais pyriteux et la fréquence de lavage de la voiture puisqu'environ 70% des propriétaires actuels ne lavent pas leur voiture dans le garage. Il faut noter que les statistiques sont basées sur les habitudes du propriétaire actuel et non sur l'ensemble des propriétaires actuel et antérieurs. Ainsi, si le propriétaire actuel a acquis la maison il y a un an et que la maison a 20 ans, ses habitudes d'utilisation du garage peuvent ne pas être représentatives de l'utilisation qui a été faite du garage au cours des 20 années. De là vient l'importance de savoir si le propriétaire actuel est le premier propriétaire de la maison (voir figure 4.3).

#### 5.2.4 Température du garage pendant l'hiver

La température du garage pendant l'hiver a été notée. La figure 5.5 montre la distribution des températures en °C. Les cas ayant un niveau de confiance «non » n'ont pas été considérés dans la compilation des données.



**Figure 5.5 Température des garages pendant l'hiver**

Encore une fois, il faut noter que les statistiques sont basées sur les habitudes du propriétaire actuel et non sur l'ensemble des propriétaires actuel et antérieurs. La figure 5.5 ne présente que les garages chauffés. En plus des garages chauffés représentés à la figure 5.5, 28 garages non chauffés l'hiver ont été visités. Ainsi, la température dans ces garages peut varier considérablement au cours des saisons selon la température extérieure et peut aussi baisser sous le point de congélation. On retrouve tous les niveaux de confiance dans les garages non chauffés et dans les garages chauffés à basse température ( $T < 5^{\circ}\text{C}$ ), à moyenne température ( $5^{\circ}\text{C} \leq T \leq 15^{\circ}\text{C}$ ) et à température élevée ( $T > 15^{\circ}\text{C}$ ). Il n'y a donc pas de relation entre la température du

garage et le degré de réactivité du remblai même si, en théorie, le gradient thermique entre le dessous et le dessus de la dalle pourrait jouer un rôle dans la réaction.

### **5.2.5 Localisation de la fissuration**

L'analyse de la localisation des fissures n'a portée que sur les dalles de garage à partir du croquis réalisé lors du relevé visuel. Trois différentes localisations ont été considérées. Premièrement, il y a la moitié avant de la dalle du garage qui se situe approximativement entre le puisard et la porte du garage, deuxièmement, il y a la moitié arrière de la dalle du garage qui se situe approximativement entre le puisard et le mur arrière du garage et finalement il y a la totalité de la surface de la dalle du garage. Les résultats sont compilés au tableau 5.13.

**TABLEAU 5.13 LOCALISATION DE LA FISSURATION SUR LA DALLE DU GARAGE**

<b>Endroit des dommages</b>	<b>Niv. de confiance : Très probable et probable Nombre de cas</b>	<b>Pourcentage</b>	<b>Niv. de confiance : peut-être et peu probable Nombre de cas</b>	<b>Pourcentage</b>
N/A*	14	9%	4	18%
Moitié arrière	1	1%	3	14%
Moitié avant	19	12%	5	23%
Toute la surface	120	78%	10	45%
<b>Total</b>	<b>154</b>	<b>100%</b>	<b>22</b>	<b>100%</b>

\* N/A signifie que la localisation de la fissuration n'a pas été noté dans ces cas.

Les premiers soulèvements se situent généralement là où il y a une concentration des contraintes d'expansion. Les manifestations apparaissent d'abord par le soulèvement de la dalle qui offre le moins de résistance. Il n'y aurait donc pas de raison que le gonflement se produise plus souvent dans la partie arrière ou avant de la dalle de garage. Il n'est donc pas étonnant que la localisation de la fissuration se situe dans la grande majorité des cas sur toute la surface de la dalle. Il est par contre étonnant que, lorsqu'il y a seulement une moitié de dalle affectée par des soulèvements, ce soit majoritairement la moitié avant la plus affectée. Ceci peut être causé par une combinaison de phénomènes qui influencent le gonflement du remblai pyriteux comme l'entrée du gel par la porte de garage, par les fissures, la migration de l'humidité, etc. Les fissures remplies d'eau

voient leur ouverture s'agrandir lorsque l'eau gèle. Une fissure plus large permet un meilleur échange d'oxygène et d'humidité entre le remblai et l'air ambiant, améliorant ainsi les conditions d'oxydation de la pyrite.

#### **5.2.6 Position des gouttières autour du garage**

La distance relative (loin ou près) de l'égouttement de l'eau des gouttières par rapport aux fondations du garage a été notée. On retrouve les résultats en fonction des niveaux de confiance au tableau 5.14.

**TABLEAU 5.14 GOUTTIERES AUTOUR DU GARAGE**

<b>Lieu où l'eau des gouttières s'élimine</b>	<b>Niv. de confiance : Très probable et probable Nombre de cas</b>	<b>Pourcentage</b>	<b>Niv. de confiance : peut-être et peu probable Nombre de cas</b>	<b>Pourcentage</b>
N/A	14	9%	2	9%
Absente	6	4%	1	5%
S'égoutte loin de la fondation	64	42%	9	41%
S'égoutte près de la fondation	70	45%	10	45%
Total	154	100%	22	100%

Encore une fois, il faut noter que la disposition des gouttières au moment du relevé visuel relève du propriétaire actuel et non sur l'ensemble des propriétaires possédant ou ayant déjà possédé la maison. Les résultats en pourcentage sont quasi identiques pour les deux regroupements de niveaux de confiance. Il y a pratiquement autant de gouttières qui s'égouttent loin de la fondation qu'il y en a qui s'égouttent près de la fondation. On aurait été porté à croire qu'il y aurait eu plus de gouttières qui s'égoutteraient près des fondations, amenant un apport d'eau, donc d'humidité, supplémentaire au remblai et favorisant la réaction d'oxydation de la pyrite. Ceci a été infirmé. Ainsi, l'emplacement des gouttières par rapport aux fondations ne semble pas jouer un rôle important dans le phénomène d'oxydation de la pyrite. D'autres facteurs peuvent entrer en jeu pour l'apport d'eau dans le remblai comme la pente du terrain, le niveau de la nappe phréatique,

le type de terrain naturel (perméable ou imperméable), la présence d'un cours d'eau à proximité, l'écoulement de l'eau de la rue et des terrain avoisinant (côte, mont St-Bruno).

### **5.2.7 Événements déclencheurs du gonflement du remblai**

Dans les informations recueillies auprès des propriétaires actuels, on note que plusieurs d'entre eux attribuent le début du gonflement et l'apparition de fissures à un ou à des événements qui auraient pu déclencher ou amorcer la réaction dans le remblai du garage et le début des dommages. Ainsi, selon eux, avant l'événement déclencheur, aucun ou peu de dommages étaient visibles. Après l'événement déclencheur, les dommages seraient apparus rapidement et de façon évidente. Les événements notés incluent le remplacement de la dalle de béton. Selon les propriétaires, l'ancienne dalle était endommagée et la nouvelle dalle a montré des débuts de fissuration et de soulèvement dès sa confection. Les résultats sont donnés au tableau 5.15.

**TABLEAU 5.15 ÉVÉNEMENTS DECLENCHEURS DES DOMMAGES AU GARAGE**

<b>Événement déclencheur selon les propriétaires actuels</b>	<b>Niv. de confiance : Très probable et probable Nombre de cas</b>	<b>Niv. de confiance : peut-être et peu probable Nombre de cas</b>
Réparation partielle	1	1
Nouvelle dalle	3	-
Nouvelle dalle armée	4	1
Infiltration d'eau/inondation	3	-
Tremblement de terre/dynamitage	1	-
Verglas	19	1
<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>3</b>

Encore une fois, il faut noter que les événements déclencheurs sont basés sur les connaissances du propriétaire actuel et non sur les connaissances de l'ensemble des propriétaires actuels et antérieurs. Plusieurs propriétaires ont mentionné que les dommages sont apparus dans les mois suivant la période de verglas de janvier 1998. Un certain nombre (donnée inconnue) possèdent une pompe qui n'a pas pu fonctionner par manque d'électricité. Normalement, les pompes ne fonctionnent pas en janvier mais plutôt au dégel du printemps lorsque la fonte des neiges fait remonter la nappe phréatique. Cependant, la période de verglas peut être considérée comme une



période de dégel puisque la température oscillait autour de 0°C. En effet, certains propriétaires qui n'ont pas manqué d'électricité ont vu leur pompe fonctionner durant la période de verglas. Même chose pour les propriétaires qui ont manqué d'électricité : lorsque l'électricité est revenue, les pompes ont fonctionné. Ainsi, lors des jours sans électricité, la nappe phréatique se serait élevée sans que le pompage ne la rabatte. Le gypse dans le remblai a été mis en solution et a remonté jusqu'à la dalle avec la montée de la nappe phréatique. Lorsque le remblai est saturé en eau, peu de réaction se produit par manque d'oxygène mais, lorsque la nappe s'abaisse, toutes les conditions favorables sont réunies pour que l'oxydation de la pyrite et la formation de sulfure se produisent.

De plus, les observateurs ont rapporté que quelques propriétaires de St-Bruno ont vu de la fissuration apparaître à la suite de dynamitage à la carrière Goyer. Les secousses ont fait fissurer les dalles de béton créant un chemin préférentiel à l'humidité et l'oxygène vers le remblai.

### **5.3 Observations spécifiques aux sous-sols**

Pour l'ensemble des sous-sols, des points particuliers ont été observés et notés.

#### **5.3.1 État des cloisons et des portes du sous-sol**

Le tableau 5.16 présentent l'état des cloisons et des portes se trouvant au sous-sol. Les résultats sont classés selon leur niveau de confiance.

**TABLEAU 5.16 ÉTAT DES CLOISONS ET DES PORTES DU SOUS-SOL**

Cloison(s)	Porte(s)	Niv. de confiance : Très probable et probable Nombre de cas	%	Niv. de confiance : peut-être et peu probable Nombre de cas	%
N/A*	N/A**	2	3%	2	8%
	Aucun dommage	1	1%	-	-
Aucun dommage	N/A**	4	5%	-	-
	Aucun dommage	37	51%	20	77%
	Ferment mal	7	10%	-	-
	Pas de porte	11	15%	4	15%
Fissurées	Ferment mal	2	3%	-	-
Flambage	Ferment mal	1	1%	-	-
Pas de cloison	Aucun dommage	2	3%	-	-
	Pas de porte	6	8%	-	-
<b>Total</b>		<b>73</b>	<b>100%</b>	<b>26</b>	<b>100%</b>

\* Signifie que l'état des cloisons n'a pas été noté.

\*\* Signifie que l'état des portes n'a pas été noté.

Il est difficile de conclure quelque chose de ces résultats puisque les chiffres sont très petits. Par contre, on peut quand même observer que seulement trois sous-sols visités sur soixante-treize possèdent des dommages aux cloisons et aux portes en même temps. Aussi, sept sous-sols possèdent des portes qui ferment mal mais les cloisons sont en bon état. Ainsi, 90% des sous-sols se retrouvant au tableau 5.16 ont des portes et des cloisons en bon état.

### 5.3.2 Dommage à l'étage au-dessus du sous-sol

Pour les niveaux de confiance très probable, probable, peut-être et peu probable, 87 maisons possèdent des rez-de-chaussée au-dessus du sous-sol sans dommage. Par contre, 3 maisons possèdent des cloisons avec des dommages au rez-de-chaussée et 9 maisons possèdent des soulèvements à l'étage au-dessus du sous-sol allant de peu important (1 mm) à très important (50 mm).

### 5.3.3 Position des gouttières autour du sous-sol

La distance relative (loin ou près) de l'égouttement de l'eau des gouttières par rapport aux fondations du sous-sol a été notée. On retrouve les résultats en fonction des niveaux de confiance au tableau 5.17.

**TABLEAU 5.17 GOUTTIERES AUTOUR DU SOUS-SOL**

<b>Lieu où l'eau des gouttières s'élimine</b>	<b>Niv. de confiance : Très probable et probable Nombre de cas</b>	<b>Pourcentage</b>	<b>Niv. de confiance : peut-être et peu probable Nombre de cas</b>	<b>Pourcentage</b>
N/A	4	5%	1	4%
Absente	4	5%	1	4%
S'égoutte loin de la fondation	35	48%	10	38%
S'égoutte près de la fondation	30	41%	14	54%
Total	73	100%	26	100%

Encore une fois, il faut noter que la disposition des gouttières au moment du relevé visuel relève du propriétaire actuel et non sur l'ensemble des propriétaires actuel ou antérieurs. Les résultats en pourcentage sont comparables pour les deux regroupements de niveaux de confiance. Il y a un peu plus de gouttières qui s'égouttent loin de la fondation qu'il y en a qui s'égouttent près de la fondation pour les niveaux de confiance très probable et probable. On retrouve l'inverse dans le cas des niveaux de confiance peut-être et peu probable. Encore une fois, l'emplacement des gouttières par rapport aux fondations ne semble pas jouer un rôle important dans le phénomène d'oxydation de la pyrite.

### 5.3.4 Événements déclencheurs du gonflement du remblai

Les événements qui auraient pu déclencher ou amorcer la réaction dans le remblai du sous-sol et le début des dommages, selon les propriétaires, ont été notés dans les relevés visuels. Ainsi, avant l'événement déclencheur, aucun ou peu de dommages étaient visibles. Après l'événement

déclencheur, les dommages sont apparus rapidement et de façon évidente. Les résultats sont donnés au tableau 5.18.

**TABEAU 5.18 ÉVÉNEMENTS DECLENCHEURS DES DOMMAGES AU SOUS-SOL**

<b>Événement déclencheur selon les propriétaires actuels</b>	<b>Niv. de confiance : Très probable et probable Nombre de cas</b>	<b>Niv. de confiance : peut-être et peu probable Nombre de cas</b>
Réparation partielle	1	-
Infiltration d'eau/inondations	6	1
Dégât d'eau	5	2
Dynamitage et dégât d'eau	1	-
Tremblement de terre/dynamitage	1	-
Fuite d'eau de la piscine	2	-
Verglas et piscine	1	-
Verglas	4	1
Arbre à proximité	1	-
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>4</b>

Encore une fois, il faut noter que les événements déclencheurs sont basés sur les connaissances du propriétaire actuel et non sur les connaissances de l'ensemble des propriétaires possédant ou ayant déjà possédé la maison. Les dommages au sous-sol reliés au verglas sont beaucoup moins nombreux que pour les garages. On retrouve six sous-sols dont l'événement déclencheur est le verglas. On retrouve plus d'éléments déclencheurs reliés à des dégâts d'eau ou des inondations (15). En effet, l'eau est un des ingrédients nécessaires au déclenchement de la réaction d'oxydation de la pyrite.

### 5.3.5 Dénivelé du terrain autour de la maison

Le dénivelé autour de la maison a été noté en faisant une distinction entre le dénivelé de la partie avant du terrain et le dénivelé de la partie arrière du terrain. Le tableau 5.19 montre les résultats.

**TABLEAU 5.19 DENIVELE DU TERRAIN AUTOUR DE LA MAISON**

<b>Partie avant du terrain</b>	<b>Partie arrière du terrain</b>	<b>Niv. de confiance : Très probable et probable Nombre de cas</b>	<b>%</b>	<b>Niv. de confiance : peut-être et peu probable Nombre de cas</b>	<b>%</b>
N/A*	N/A**	6	8%	2	8%
	Incliné vers l'arrière	2	3%	-	-
	Surélevé	1	1%	-	-
Incliné vers la rue	N/A**	10	14%	4	15%
	Incliné vers l'arrière	1	1%	-	-
	Plat	11	15%	3	12%
	Surélevé	6	8%	4	15%
Plat	Incliné vers l'arrière	-	-	2	8%
	Plat	21	29%	9	35%
	Surbaissé	4	6%	2	8%
	Surélevé	6	8%	-	-
Surbaissé	Surbaissé	1	1%	-	-
Surélevé	Surélevé	4	6%	-	-
<b>Total</b>		<b>73</b>	<b>100%</b>	<b>26</b>	<b>100%</b>

\* Signifie que le dénivelé de la partie avant du terrain n'a pas été noté.

\*\* Signifie que le dénivelé de la partie arrière du terrain n'a pas été noté.

Près du tiers des terrains sont plats à l'avant comme à l'arrière de la résidence. Ainsi, le drainage de ces terrains se fait verticalement sans composante horizontale. Par la suite vient la combinaison du terrain plat à l'arrière et incliné vers la rue à l'avant.

#### **5.4 Fiabilité des relevés visuels**

Le relevé visuel des dommages dans une pièce d'une résidence s'est fait à partir de fiches où des critères d'observation bien précis ont été choisis. Il reste toutefois que l'appréciation globale de chacun de ces critères par l'observateur peut différer légèrement d'une personne à l'autre. L'investigation résidentielle des 224 cas sur la Rive-Sud de Montréal dont il est question ici s'est faite par quatre principaux observateurs ainsi que par deux observateurs occasionnels.

Seuls les quatre principaux observateurs ont eu une formation, quoique très restreinte, puisque seulement d'une journée. Ainsi, il est probable que les observateurs aient eu une perception

différente des dommages. Ceci entraîne une certaine partie de subjectivité dans les résultats en fonction des connaissances de chacun. En effet, les observateurs sont des étudiants en génie civil soit du baccalauréat, de la maîtrise ou du doctorat.

D'autre part, il est difficile pour l'observateur de déterminer la ou les causes réelles des dommages lorsque ceux-ci sont minimes. Il s'agit de la zone grise. Elle est située entre les cas ne comportant aucun dommages et ceux qui en ont assez. Lorsqu'il n'y a aucun dommage visible, aucune cause n'est en jeu puisque qu'aucun problème ne se manifeste. Lorsqu'il y a beaucoup de dommages, les signes révélateurs du problèmes sont très prononcés et évidents ce qui simplifie la tâche pour trouver la cause du problème. Lorsqu'il y a seulement quelques faibles signes et peu de dommage, il est difficile pour l'observateur de déterminer si les dommages observés sont vraiment reliés, en totalité ou en partie, à un problème de remblai gonflant. À ce moment, c'est l'expérience et le jugement de chaque releveur qui entre en jeu ce qui amène une part de subjectivité à la conclusion.

## 5.5 Discussion

Les dommages causés par le gonflement de remblai pyriteux peuvent se manifester par différents signes distinctifs de la réaction en cours. Parmi tous les symptômes observés lors des relevés visuels, certains se sont montrés plus révélateurs que d'autres. Les symptômes les plus révélateurs de la présence d'un remblai gonflant pour chacune des pièces sont:

### Garage

#### *Principaux symptômes*

- Soulèvements de la dalle
- Fissures dans les murs de fondation avec déplacement latéral
- Fissures en étoile et longitudinales

#### *Autres symptômes*

- Poudre blanchâtre (surtout lorsque la pièce est non utilisée)
- Briques lésardées

### Sous-sol

#### *Principaux symptômes*

- Soulèvements de la dalle
- Fissures en étoile
- Dommages à l'étage supérieur

#### *Autres symptômes*

- Poudre blanchâtre (surtout lorsque la pièce est non utilisée).

Parmi les symptômes les plus représentatifs d'un remblai gonflant, il y a les soulèvements que l'on observe au garage et au sous-sol. Il faut noter que la majorité des soulèvements maximaux

mesurés au garage sont deux fois plus prononcés que ceux mesurés au sous-sol. En effet, la majorité des soulèvements maximaux mesurés au garage se situent entre 0 et 30 mm tandis qu'au sous-sol, ils se situent entre 0 et 15 mm. Il faut aussi se rappeler qu'il peut y avoir plusieurs soulèvements intermédiaires entre le soulèvement maximal et minimal mesurés dans une pièce pour une maison donnée.

Les fissures en étoile sont un autre symptôme révélateur. Il s'agit du type de fissure dominant au garage comme au sous-sol. En combinant les cas des garages et des sous-sols, les fissures en étoile sont le seul type de fissure observé dans 55% du temps. Elles sont par contre souvent combinées à des fissures longitudinales. Les ouvertures des fissures sont plus importantes au garage qu'au sous-sol. Pour les niveaux de confiance très probable et probable, l'ouverture des fissures est très importante ( $> 5$  mm) dans 46% des cas au garage contre 25% des cas au sous-sol. Ceci peut être relié à la gravité des dommages que l'on retrouve dans les deux pièces. Il y a beaucoup plus de fissures dans les murs de fondation entourant le garage que dans ceux entourant le sous-sol. De plus, elles y sont souvent majeures et formées sur le mur de côté du garage. La présence de briques lézardées, qui accompagne souvent les fissures des murs de fondation, est plus fréquente dans le cas où les niveaux de confiance sont élevés (52 garages sur 58). La dalle du garage est le plus souvent endommagée sur toute sa surface. Lorsqu'une seule partie de la dalle est endommagée, il s'agit le plus souvent de la partie avant de la dalle.

La présence de poudre blanchâtre est aussi considérée comme un symptôme révélateur lorsqu'il y en a beaucoup. Par contre, les personnes habitant les maisons ont tendance à disperser la poudre lors de leur activité quotidienne. Il est donc difficile de faire des conclusions à partir de l'observation de ce symptôme surtout lorsque le lieu étudié est utilisé régulièrement.

L'événement déclencheur qui revient le plus au garage est le verglas (19 cas sur 31). Au sous-sol, il s'agit des dégâts d'eau et des inondations (11 cas sur 22).

Près du tiers des terrains (29%) entourant les maisons étudiées sont plats à l'avant ainsi qu'à l'arrière de la maison.

Certains symptômes ont été observés lors des relevés visuels en croyant qu'ils avaient un lien avec les dommages associés à un remblai gonflant. La compilation des données recueillies n'a pu trouver de relation entre certains symptômes et les remblais gonflants. Voici la liste des observations qui n'ont pas su être révélatrice à la présence de remblai pyriteux sous la dalle de béton :

- Au sous-sol, il est difficile de bien observer le type des fissures car, il y a souvent une bonne partie de la dalle du sous-sol qui est recouverte (moins de 30% de la surface visible dans 50% des cas) ;
- Il est difficile d'établir un lien entre l'ouverture des fissures des murs de fondation et leur déplacement ;
- La présence et le nombre de fissures dans les dalles d'entrée du garage ne sont pas directement reliés avec l'état de la porte de garage à savoir si elle se ferme bien ou non ;
- Aucune relation n'a pu être établie entre les habitudes des propriétaires, soit le lavage de la voiture dans le garage et la température du garage l'hiver, et les dommages associés à un remblai gonflant ;
- La position des gouttières entourant le sous-sol et le garage ne semblent pas être reliée aux dommages ;
- Au sous-sol, près du trois-quarts des cloisons et des portes sont en bon état et leur observation ne donne pas d'informations sur leur lien avec les dommages ;
- Trop peu d'étage au-dessus du sous-sol sont endommagés pour établir une tendance.

Les dommages reliés au remblai gonflant et observés dans les garages et sous-sol des bâtiments résidentiels montrent que les dommages sont souvent plus importants dans les garages que dans les sous-sols. Ceci peut être causé par un remblai de plus grande épaisseur dans le garage que dans le sous-sol. En effet, plus le remblai est épais, plus grande sera la quantité de roche pyriteuse sous la dalle de béton et plus élevée sera la quantité de pyrite qui pourra s'oxyder. Par contre, l'épaisseur du remblai du garage versus celui du sous-sol dépend du type de maison étudiée. De plus, il faut tenir compte que les pratiques dans la construction ont changé avec les années. Les remblais ont tendance à être de plus en plus épais avec le temps et de plus en plus nombreux.



Lorsque l'on observe des dommages associés à un problème de remblai gonflant, il faut déterminer s'il s'agit de problèmes d'ordre esthétique ou bien d'ordre structural. Les problèmes esthétiques affectent principalement le confort des occupants. Par exemple, cela peut être des fissures et des soulèvements de la dalle de béton. Les problèmes structuraux affectent principalement l'intégrité structurale de la maison. Ceux-ci peuvent engendrer d'autres problèmes et remettre en cause la sécurité des occupants. On retrouve, entre autres, les fissures dans les murs de fondation ainsi que leur déplacement. On peut remédier au problème d'ordre esthétique selon le degré de confort recherché par les occupants. Par contre, on devrait pallier aux problèmes d'ordre structuraux à court terme. Ceux-ci engendrent des dépenses souvent plus élevées que lors des réparations d'ordre esthétique.

Il faut aussi garder en tête que les dommages observés peuvent être la combinaison de plusieurs problèmes. Par exemple, on peut observer des mouvements de la dalle de béton lors de tassements différentiels du sol. En effet, dans les municipalités de Longueuil et Boucherville, on retrouve souvent un sol naturel composé de silt argileux. Dans la ville de St-Bruno, le sol naturel se compose souvent de silt argileux à de l'argile. Ces types de sol ont une perméabilité très faible et peuvent contenir beaucoup d'eau. Lors de l'assèchement du sol, il y a une perte en eau. Le sol diminue donc de volume et provoque des tassements différentiels. Voici une brève liste des phénomènes pouvant coexister avec celui du gonflement du remblai :

- Tassements différentiels du sol
- Mauvaise compaction du matériau de remplissage
- Sécheresse
- Gel et dégel

Un autre phénomène qui peut être associé au remblai gonflant est la sulfatation de la dalle de béton. Les dommages visuels associés à la sulfatation sont semblables à ceux associés au gonflement du remblai. Il y a formation de fissures en étoile et soulèvement de la dalle. Les soulèvements de la dalle par sulfatation sont causés par la délamination de la dalle de béton. La délamination est le résultat de l'attaque du béton par des sulfates provenant principalement des shales et des calcaires mais aussi des cornéennes. Le remblai n'a pas besoin de changer de volume pour provoquer ces soulèvements. La sulfatation peut aussi présenter une dégradation de

la surface du béton. Il faut bien différencier la cause de cette dégradation pour ne pas la mélanger avec l'attaque de la surface par les sels de déglacage amenés avec la voiture, le lavage de la voiture et l'usure normale de la surface. Le taux d'avancement de la sulfatation dépend beaucoup de la qualité du béton. Si le béton a été conçu avec beaucoup d'eau et s'il est très poreux, la sulfatation va être plus rapide. Deux solutions efficaces peuvent être mises de l'avant pour prévenir la sulfatation. Premièrement, il faut mettre un polyéthylène entre le remblai et la dalle de béton. Deuxièmement, il faut utiliser un béton de meilleure qualité : faible retrait, résistance élevée, faible porosité, bonne épaisseur, bon mûrissement. Si les moyens le permettent, il est aussi possible d'utiliser un béton résistant aux sulfates (type 50).

## 6 RÉSULTATS DES SITES INSTRUMENTÉS

Parmi les maisons visitées au mois de mars 1999 et au cours de l'été 1999, cinq bâtiments résidentiels ont été sélectionnés pour un projet d'instrumentation. Toutes ces résidences présentent des problèmes de fissuration et de soulèvement dans le garage. Les dommages sont causés par un remblai pyriteux gonflant sous la dalle de béton. Les instruments ont été installés dans les maisons le 5 août 1999 pour une durée minimale de neuf mois. Par contre, pour avoir une analyse plus complète, tenant compte des variations des saisons, l'instrumentation doit être faite sur une période de un an ou plus.

### 6.1 Type d'instruments

Deux types de fissuromètres ont été retenus pour le projet d'instrumentation soit le Fissuro-Logger et le fissuromètre mécanique visuel Tell-Tale. De plus, dans chacune des maisons, un hygromètre et un thermomètre ont été installés près des fissuromètres.

#### 6.1.1 Fissuromètre de type Fissuro-Logger

Le Fissuro-Logger (voir figure 6.1) mesure et enregistre en continu l'ouverture de fissure ou de joint et la température. Il s'agit d'un capteur enregistreur autonome destiné à la surveillance simultanée des variations d'ouverture d'une fissure ou du déplacement relatif entre deux parties d'ouvrage et de la température ambiante.

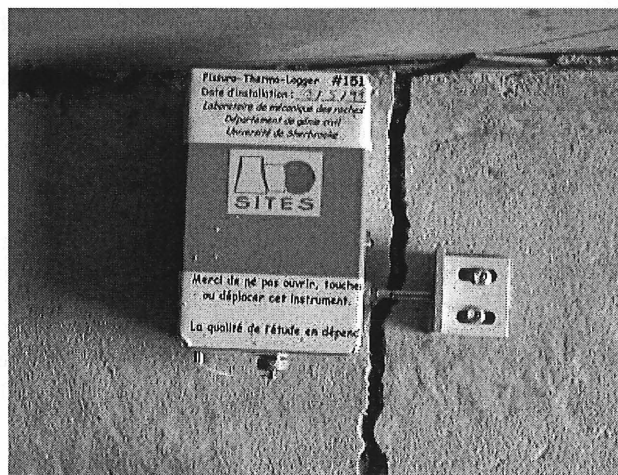


Figure 6.1 Fissuro-Logger

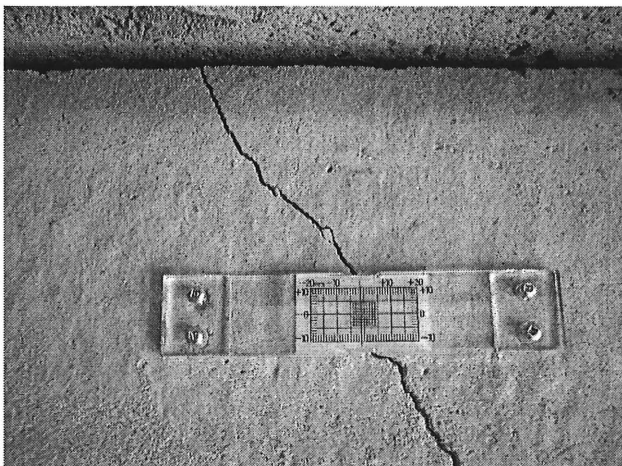
Le fissuromètre est alimenté d'une pile au lithium. Le boîtier comprend un capteur de déplacements de type résistif, un circuit électronique de conditionnement et une EEPROM de stockage des données pilotée par un microcontrôleur. Une sonde de température est intégrée au boîtier. Le boîtier est fixé solidairement à la structure. L'extrémité de la tige du capteur de déplacement qui sort du boîtier, est positionnée en butée sur une équerre solidaire de l'autre partie de la structure. Dès le lancement de l'appareil, celui-ci mesure et consigne les valeurs dans sa mémoire. À l'issue de la campagne d'étude du phénomène à surveiller, l'utilisateur vient rapatrier les données stockées dans l'appareil, à partir d'un ordinateur portable. Le logiciel FISEVOL permet de configurer l'appareil, de lancer les acquisitions, de transférer et d'éditer les données recueillies. L'acquisition des données du Fissuro-Logger se fait automatiquement à toutes les deux heures. La résolution de la sonde de température est de 0,4 °C. La gamme de température va de -25 °C à +65 °C. Le capteur de déplacement a une étendue de mesure de  $\pm 5$  mm, une résolution de 0,003 mm et une précision de 0,01 mm sur toute la plage. (Voir la fiche technique à l'annexe 1)

#### 6.1.2 Fissuromètre de type Tell-Tale

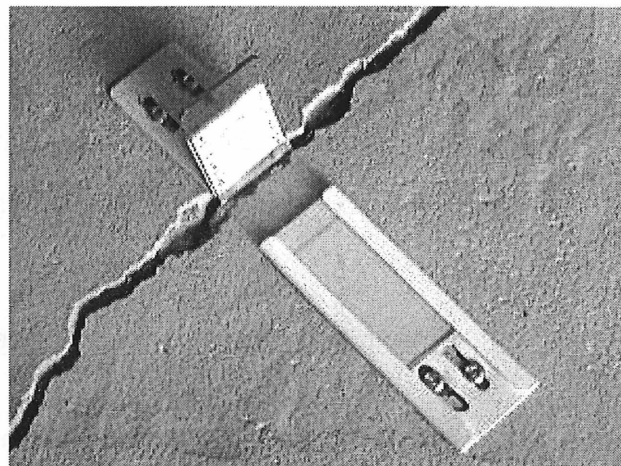
Le fissuromètre Tell-Tale est constitué de deux plaques superposées sur une partie de leur longueur. La plaque du bas est graduée au millimètre près tandis que la plaque du dessus est transparente et est marquée d'un trait rouge servant de curseur. Les fissuromètres sont installés perpendiculairement à la fissure. Lorsque la fissure s'ouvre (ou se referme), les plaques bougent l'une par rapport à l'autre. Le déplacement du curseur par rapport à la graduation représente donc le mouvement produit. On retrouve quatre sortes de Tell-Tale (voir les fiches techniques à l'annexe 1) :

- 1) Le Tell-Tale standard est fabriqué en acrylique durable. Il enregistre les mouvements relatifs horizontaux et verticaux de part et d'autre d'une fissure. (voir figure 6.2)
- 2) Le Tell-Tale de coin est fabriqué en PVC rigide. Il enregistre les mouvements relatifs horizontaux et verticaux de part et d'autre d'une fissure de coin. (voir figure 6.3)

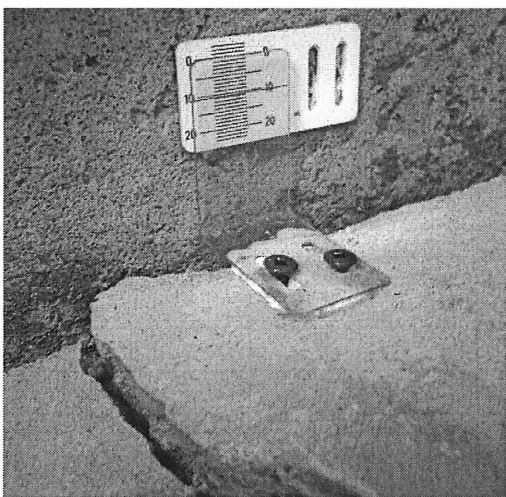
- 3) Le Tell-Tale de surface est fabriqué en PVC rigide. Il enregistre les mouvements relatifs du plancher par rapport à une structure verticale stable. (voir figure 6.4)
- 4) Le Tell-Tale de déplacement est fabriqué en PVC rigide. Il enregistre les mouvements horizontaux et verticaux de part et d'autre de la fissure située au coin d'un mur de fondation. (voir figure 6.5)



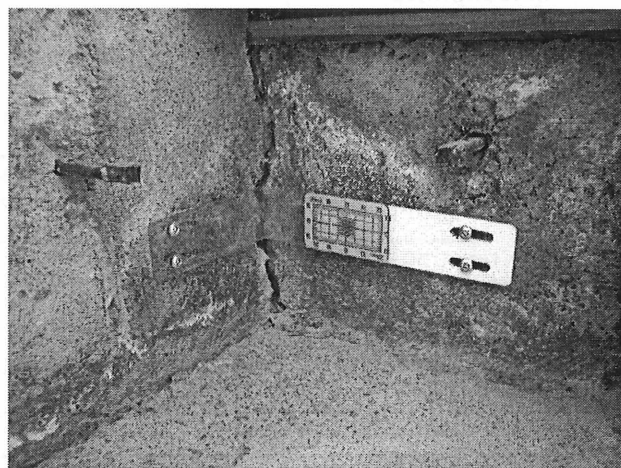
**Figure 6.2 Tell-Tale standard**



**Figure 6.3 Tell-Tale de coin**



**Figure 6.4 Tell-Tale de surface**



**Figure 6.5 Tell-Tale de déplacement**

La prise de données des fissuromètres Tell-Tale se fait par le propriétaire une fois par semaine en même temps que la lecture de la température et de l'humidité. Pour assurer la meilleure lecture possible, les mesures doivent toujours être prises par la même personne. La personne doit toujours se placer dans la même position par rapport au fissuromètre pour s'assurer de toujours

prendre la lecture avec le même angle par rapport à la graduation du fissuromètre. La précision des fissuromètres est d'un demi-millimètre.

### **6.1.3 Thermomètre et hygromètre**

Dans toutes les maisons instrumentées, un hygromètre et un thermomètre ont été installés même si un Fissuro-Logger est déjà présent pour mesurer la température. Le thermomètre et l'hygromètre sont placés près des fissuromètres tout en évitant la proximité d'un calorifère et en assurant une hauteur pratique pour les propriétaires lors de la lecture.

### **6.1.4 Répartition et positionnement des instruments**

Les fissuromètres installés dans chacune des maisons ont été choisis selon les dommages rencontrés. Le tableau 6.1 donne la répartition des instruments dans chaque résidence sélectionnée.

**TABLEAU 6.1 INVENTAIRE DES FISSUROMÈTRES**

Localisation des résidences	Fissuromètre Tale-Tell				Fissuro-Termo- Logger	Total #2
	standard	de coin	de surface	de déplacement		
St-Bruno #1	1			1		2
St-Bruno #2	2					2
LaPrairie #1	1				1	2
LaPrairie #2				1	1	2
Boucherville	1	1	1		1	4
<b>Total #1</b>	5	1	1	2	3	12

Total #1: Nombre d'instrument utilisé pour chaque type de fissuromètre.

Total #2: Nombre d'instrument installé chez chaque propriétaire.

Les cinq sections qui suivent présentent, pour chaque maison instrumentée, l'historique des dommages selon les connaissances et les observations faites par le propriétaire actuel, la description des dommages observés au garage, le positionnement des instruments installés, les

résultats de l'instrumentation sous forme de graphiques ainsi que l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

## 6.2 Étude de cas St-Bruno #1

### Historique et description des dommages de St-Bruno #1

Les dommages se sont aggravés suite au verglas de janvier 1998. Le propriétaire a été 14 jours sans électricité. Il possède une pompe pour évacuer le surplus d'eau qui n'a pas fonctionné durant cette période de dégel. Cependant, le propriétaire mentionne qu'il n'y a pas eu de montée d'eau durant le verglas et qu'il est rare qu'il y a beaucoup d'eau. Il est important de noter que la résidence se situe à proximité de la carrière Goyer où il y a eu des dynamitages donc les secousses auraient pu endommager certaines parties de la maison. Le tableau 6.2 résume les observations.

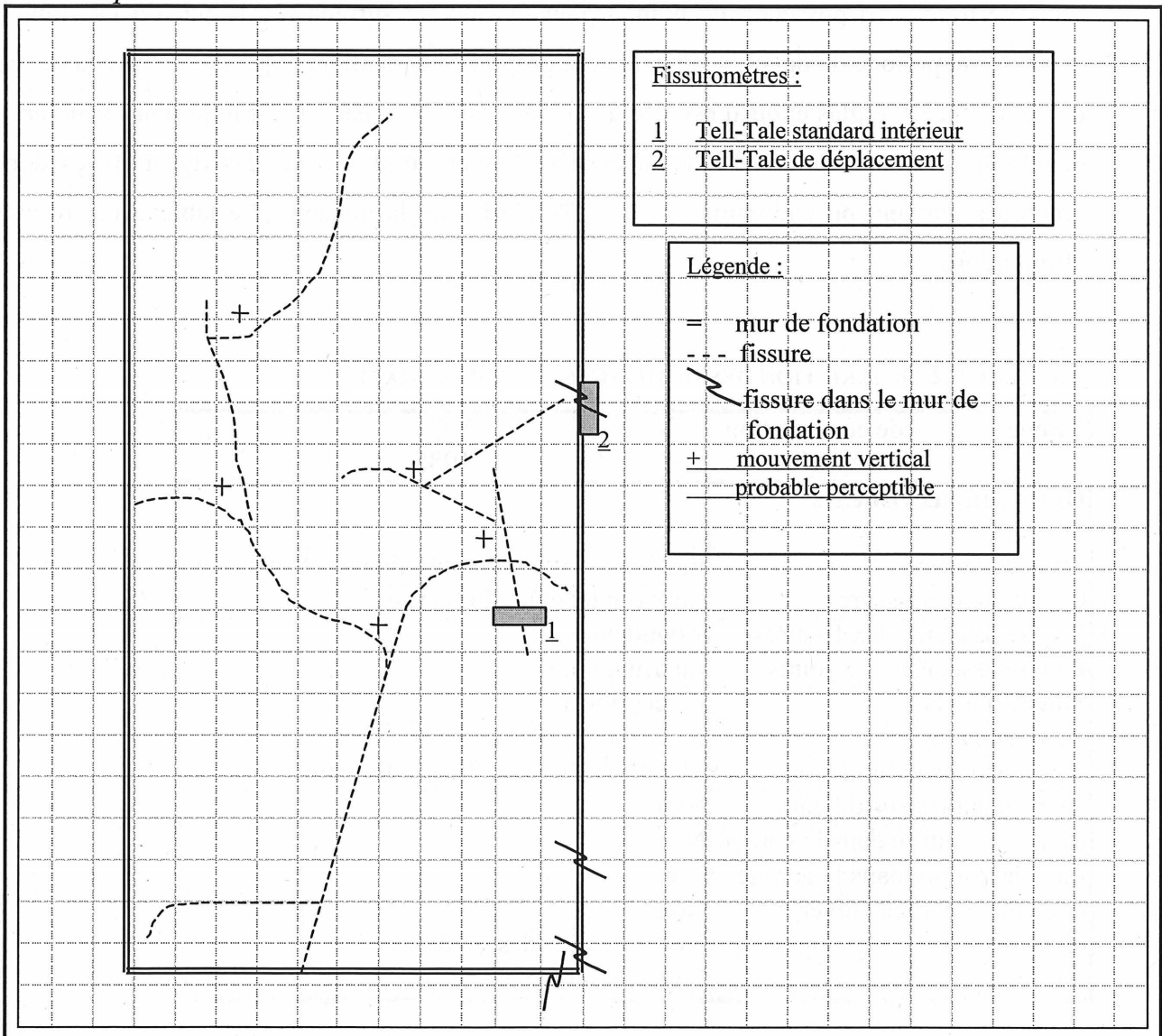
**TABLEAU 6.2 DESCRIPTION DES DOMMAGES DE ST-BRUNO #1**

<b>Année</b>	- de construction - d'acquisition	1981 1985
<b>Observations visuelles</b>		
Type de fissure	Plusieurs fissures longitudinales et en étoile	
Ouverture des fissures	Importante: entre 2 et 5 mm	
Poudre associée aux fissures	Abondante	
Poudre associées aux joints	Intermédiaire	
Soulèvements	Perceptibles	
Porte du garage	Se ferme bien	
Fissures dans la fondation	Majeure au coin et 2 entre les coins	
2e étage au-dessus du garage	Non	
Rentre la voiture dans le garage	Non	
Lave la voiture dans le garage	Non	
Chauffe le garage l'hiver	Non	
Gouttières	S'égoutte près des fondations	
Terrain	Légèrement incliné vers la rue	

## Positionnement des instruments de St-Bruno #1

Les fissures observées dans le garage de St-Bruno #1 n'ont pu être cartographiées. Le garage était beaucoup trop encombré pour pouvoir le faire. Une esquisse rapide à main levée a donc été réalisée. La figure 6.6 montre la répartition des fissures ainsi que la position des instruments installés tandis que les figures 6.7 et 6.8 montrent les photos des instruments installés.

*vue en plan*



**Figure 6.6 Cartographie des fissures et positionnement des instruments de St-Bruno #1**





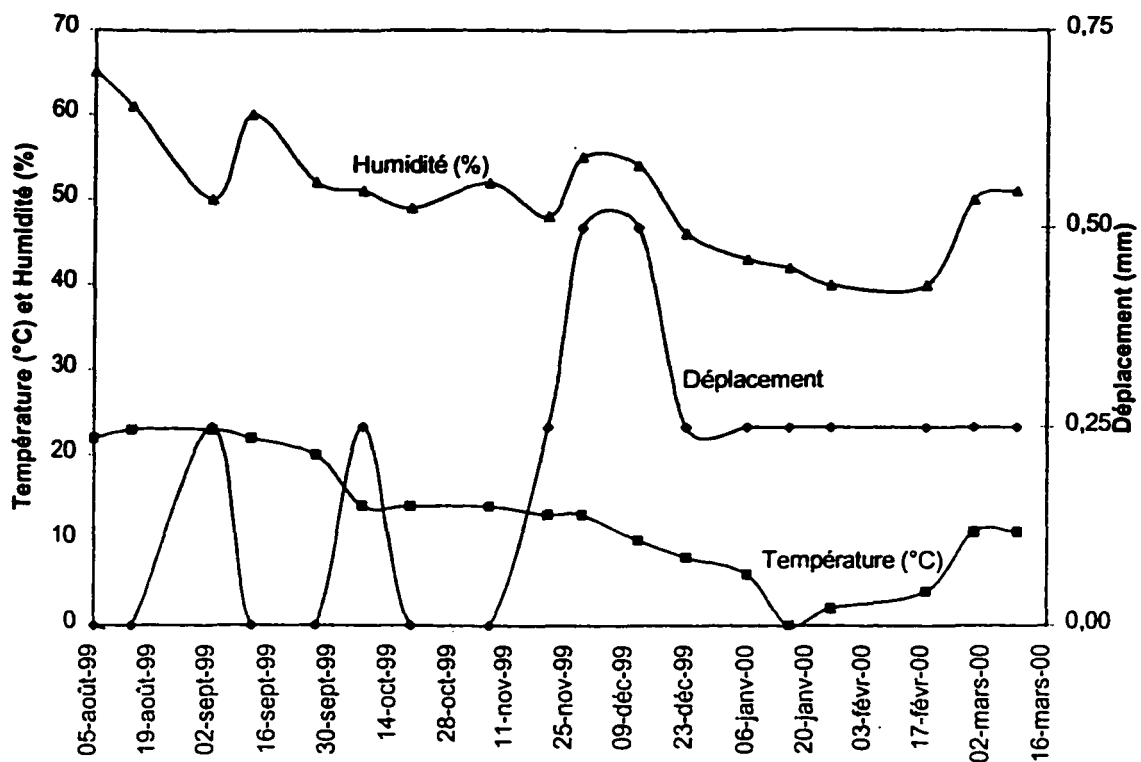
**Figure 6.7 Tell-Tale standard intérieur**



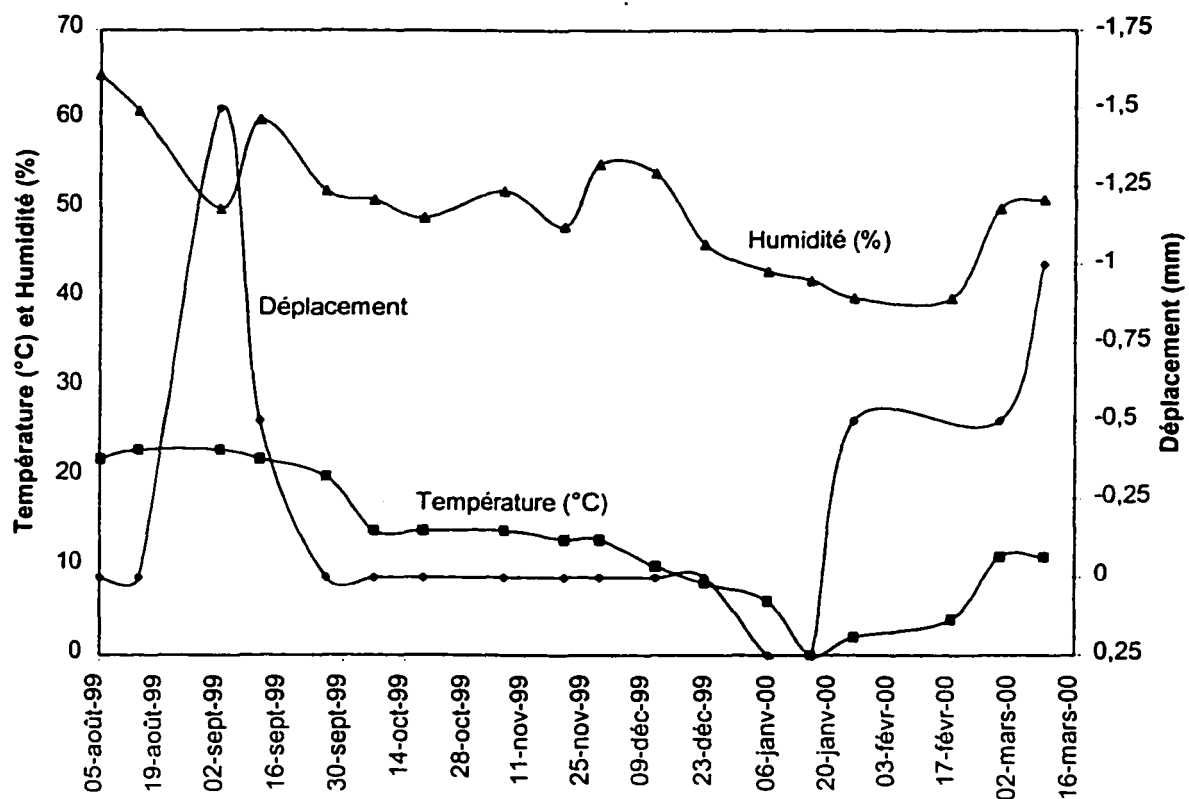
**Figure 6.8 Tell-Tale de déplacement**

### Résultats d'instrumentations de St-Bruno #1

Les figures 6.9 et 6.10 présentent les résultats d'instrumentation recueillis pour le garage St-Bruno #1 sous forme de graphique. La température et l'humidité notées par le propriétaire sont aussi illustrées.



**Figure 6.9 St-Bruno #1 – TaleTell standard – Mesure de l'ouverture de la fissure**



**Figure 6.10 St-Bruno #1 – Tell-Tale de déplacement – Mesure les mouvements de la fondation du garage**

## Analyse et interprétation de St-Bruno #1

Au début de l'étude, la maison avait 18 ans. La réaction d'oxydation de la pyrite est donc être relativement avancée. Deux fissuromètres Tell-Tale ont été installés. Le premier est un fissuromètre de type standard qui mesure l'ouverture d'une fissure près du mur de côté, mitoyen avec l'extérieur. On constate sur le graphique (figure 6.9) que les mesures varient entre 0 mm de déplacement et 0,50 mm de déplacement entre le 5 août 1999 et le 23 décembre 1999. Par la suite, le déplacement se stabilise à 0,25 mm jusqu'à la dernière mesure prise au mois de mars 2000. Les deux premières variations du déplacement, lorsque les mesures varient de 0,25 à 0 mm de déplacement à deux reprises, peuvent être attribuées au manque d'expérience du propriétaire. Aucune corrélation directe ne peut être faite entre la température, l'humidité et l'ouverture de la fissure.

Le deuxième fissuromètre est de type déplacement et est installé à l'extérieur du garage sur une fissure au centre du mur de fondation du garage. Il mesure les mouvements des lèvres de la fissures, l'une par rapport à l'autre. Le graphique (figure 6.10) montre que les déplacements de la fondation ont varié entre 0 mm et 1,5 mm. Le pic s'est produit lors de la troisième lecture. Il peut donc s'agir d'une erreur de lecture durant la période d'adaptation du lecteur. À partir du 15 janvier, le déplacement augmente de 0,25 jusqu'à -1 mm. Le déplacement de la fondation de 0 mm à 0,25 mm peut s'expliquer par une forte baisse de température à l'extérieur, ce qui aurait provoqué la contraction du béton et diminué l'écart entre les deux lèvres de la fissure. En effet, le propriétaire a mentionné que même s'il ne chauffait pas le garage, la température y descendait rarement en-dessous de 0°C sauf lorsqu'il faisait très froid à l'extérieur soit près de -30°C. Au moment où le déplacement était de 0,25 mm, la température dans le garage a chuté à 0°C.

Les deux fissuromètres ont enregistré des déplacements de 0,25 mm et de 1 mm en 7 mois de lecture. Les courbes de déplacement ne sont pas assez concluante pour évaluer la situation. Les dommages observés sont d'ordre esthétique et structural.

### 6.3 Étude de cas St-Bruno #2

#### Historique et description des dommages de St-Bruno #2

La maison est de type Tadoussac. Les maisons Tadoussac possèdent un sous-sol sur la moitié de leur superficie. L'autre moitié de la superficie de la maison est au niveau du terrain. Elle comprend le garage, l'entrée, une salle de bain et une autre pièce à l'arrière du garage. Toutes ces pièces reposent sur la même dalle de béton coulée sur un remblai. De plus, seule cette partie de la maison, sans sous-sol et au niveau de la rue, possède un deuxième étage. En 1991, les propriétaires ont fait appel au constructeur de la maison pour réparer les dommages qui consistaient alors à des soulèvements de la dalle dans l'entrée, dans la salle de bain, dans la salle de séjour et au garage ainsi qu'à des déformations des planchers au deuxième étage. Le constructeur a démolì la dalle et l'a remplacée par une dalle en béton armé en enlevant seulement une mince couche de remblai à la surface. Les fondations et la cheminée située dans la pièce à l'arrière du garage, ont été renforcées. La maison est maintenant indépendante du garage et repose sur quatre empattements aux quatre coins de la maison. Pour faire les nouveaux empattements, le remblai aux coins de la maison a été enlevé jusqu'au sol naturel. Le tableau 6.3 résume les observations.

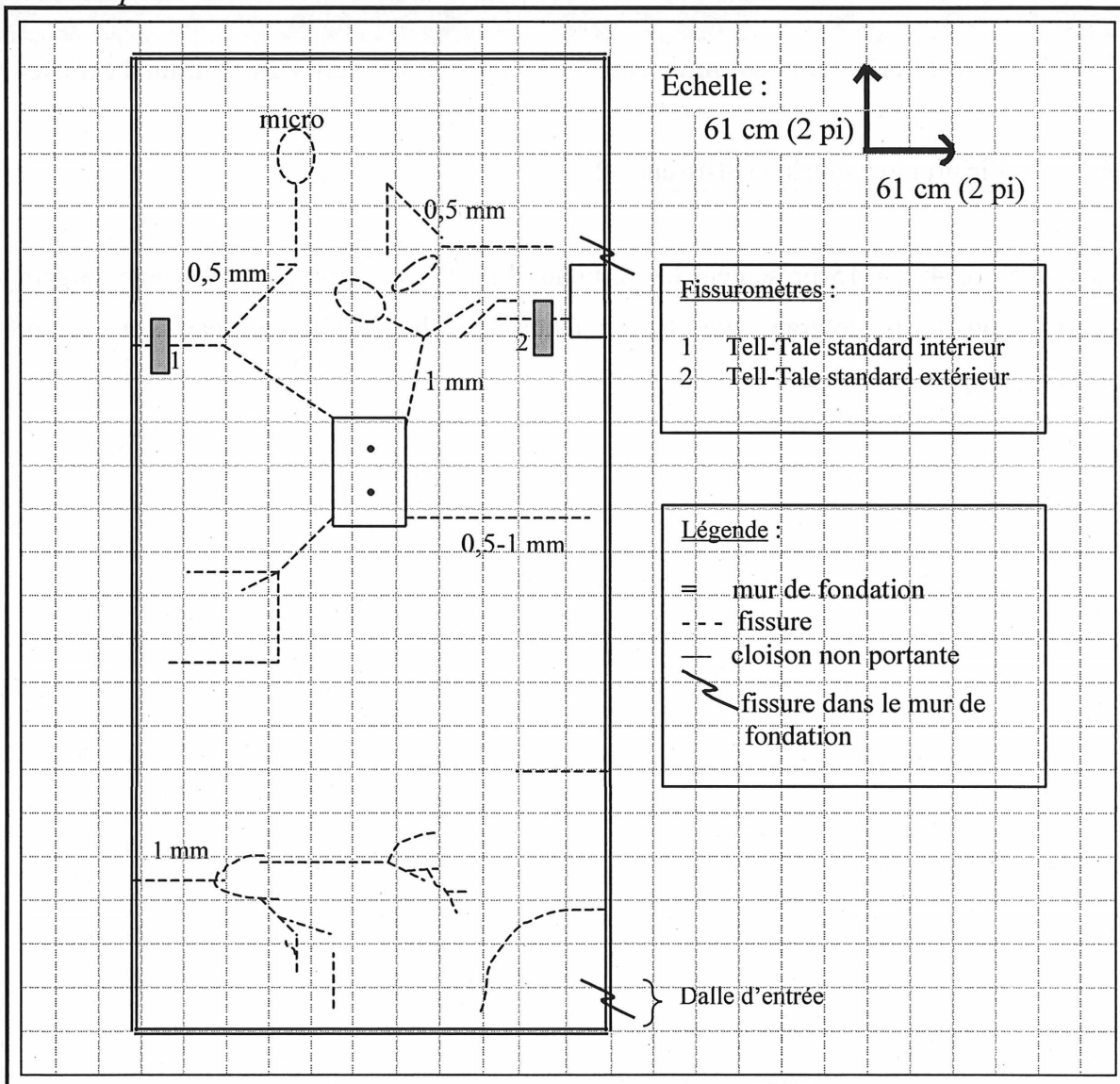
**TABLEAU 6.3 DESCRIPTION DES DOMMAGES DE ST-BRUNO #2**

<b>Année</b>	- de construction - d'acquisition	1980 1989
<b>Observations visuelles</b>		
Type de fissure	Plusieurs fissures en étoile	
Ouverture des fissures	Fine: moins de 1 mm	
Poudre associée aux fissures	Rare lorsque surface mouillée	
Poudre associées aux joints	Aucune	
Soulèvements	Très faible	
Porte du garage	Se ferme bien	
Fissures dans la fondation	2 mineures entre les coins	
2e étage au-dessus du garage	Oui	
Rentre la voiture dans le garage	Non	
Lave la voiture dans le garage	Non	
Chauffe le garage l'hiver	12 °C	
Gouttières	S'égoutte près des fondations	
Terrain	Plat	

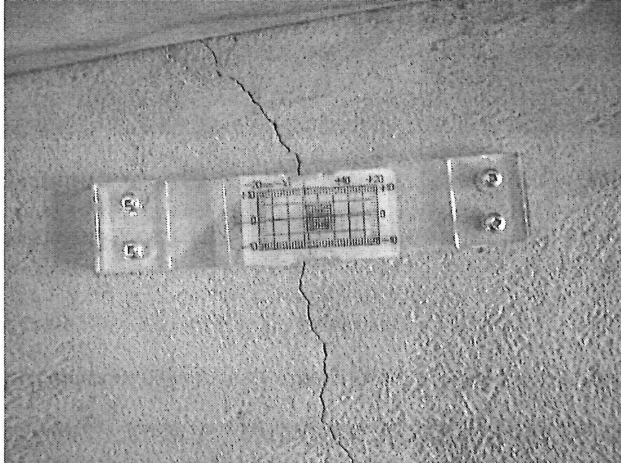
## Positionnement des instruments de St-Bruno #2

Les fissures observées dans le garage de St-Bruno #2 ont été cartographiées. L'ouverture des fissures a aussi été notée. La figure 6.11 montre la répartition des fissures et leur ouverture ainsi que la position des instruments installés tandis que les figures 6.12 et 6.13 montrent les photos des instruments installés.

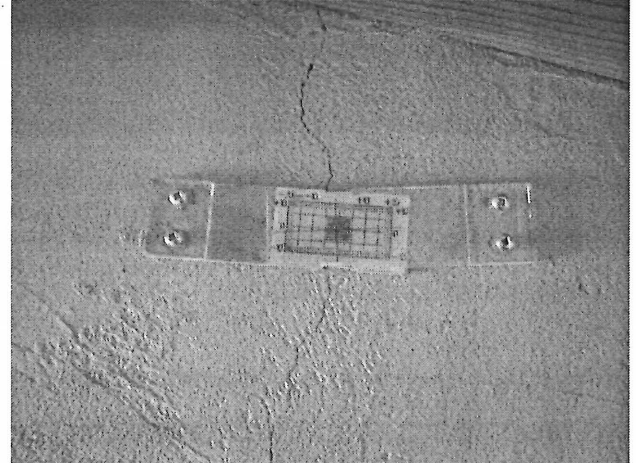
*vue en plan*



**Figure 6.11 Cartographie des fissures et positionnement des instruments de St-Bruno #2**



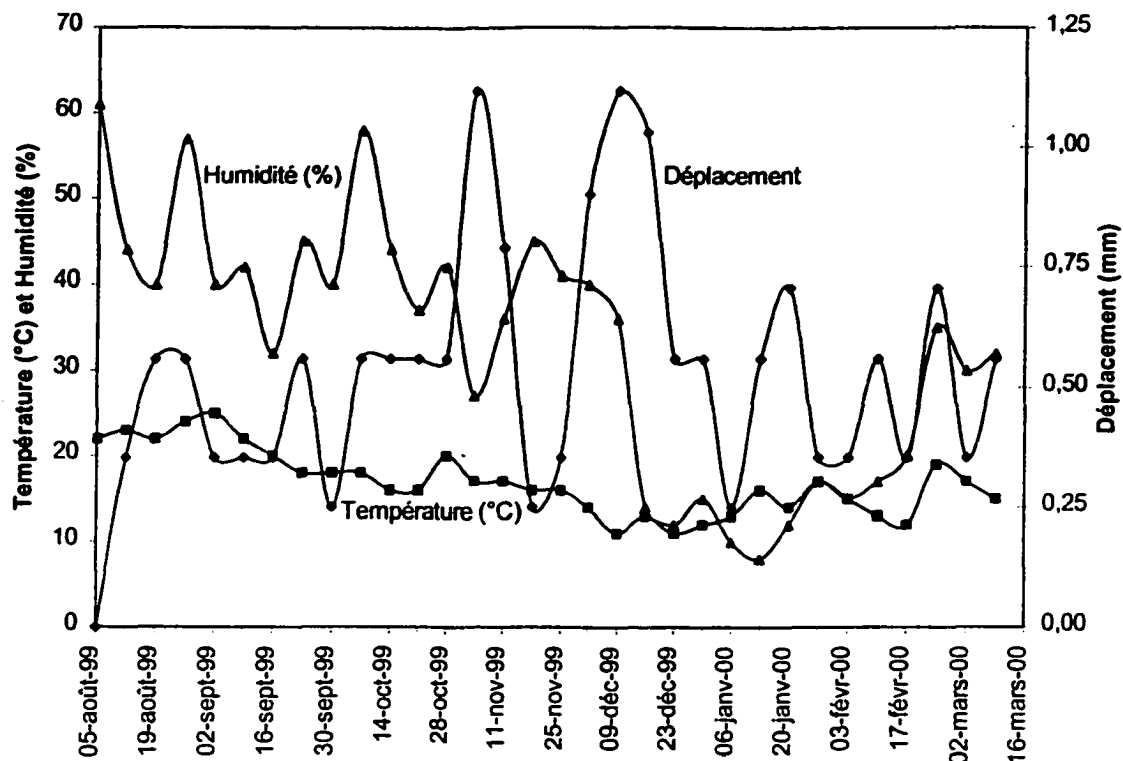
**Figure 6.12 Tell-Tale standard intérieur**



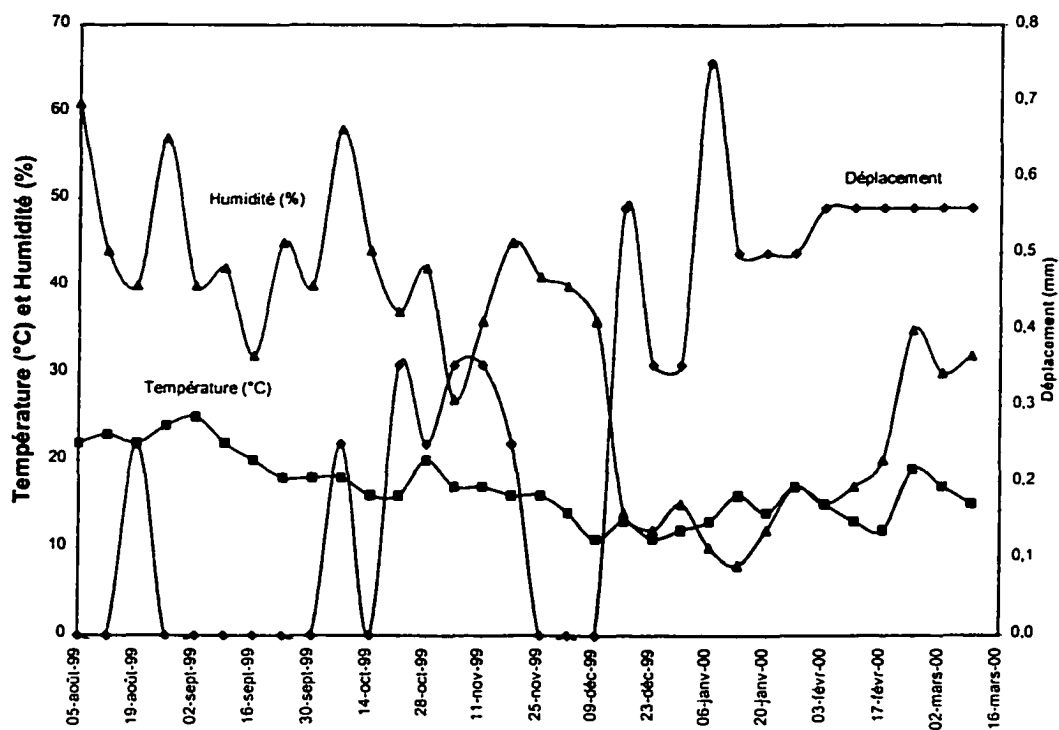
**Figure 6.13 Tell-Tale standard extérieur**

### Résultats d'instrumentations de St-Bruno #2

Les figures 6.14 et 6.15 présentent les résultats d'instrumentation recueillis pour le garage St-Bruno #2 sous forme de graphique. La température et l'humidité notées par le propriétaire sont aussi illustrées.



**Figure 6.14 St-Bruno #2 – Tell-Tale standard – Mesure l'ouverture la fissure près du mur intérieur**



**Figure 6.15 St-Bruno #2 – Tell-Tale standard – Mesure l'ouverture de la fissure près du mur extérieur**

## **Analyse et interprétation de St-Bruno #2**

La maison avait 19 ans lors du début de l'étude d'instrumentation. Par contre, les dommages visibles sont minimes car le garage a subi des réparations majeures huit ans avant le début de l'étude. Cependant, on constate qu'il existe encore des poussées provenant du remblai qui est resté inchangé. La nouvelle dalle est par contre armée. Les soulèvements sont donc très faibles. Deux fissuromètres Tell-Tale standard ont été installés. Les deux graphiques associés (figures 6.14 et 6.15) présentent beaucoup de variations d'une lecture à l'autre. Ceci est causé par la faible précision des instruments et par la faible expérience du lecteur. Par contre, après sept mois de lecture, il est quand même possible d'observer un agrandissement de l'ouverture des deux fissures d'un peu plus d'un demi-millimètre. La réaction progresse encore mais à un rythme très faible. Les dommages d'ordre structural ont été réparés en 1991. Les dommages observables au moment de l'étude sont d'ordre esthétique.

### **6.4 Étude de cas LaPrairie #1**

#### **Historique et description des dommages de LaPrairie #1**

Les propriétaires actuels ne connaissent pas l'historique des dommages observés au garage. Lors de l'achat de la maison à l'automne 1998, l'inspecteur en bâtiment a soupçonné la présence de pyrite dans le remblai du garage pour expliquer la présence de fissures dans le garage. Une analyse en laboratoire du remblai leur a indiqué que le remblai est constitué à 100% de shale. Le tableau 6.4 résume les observations.



**TABLEAU 6.4 DESCRIPTION DES DOMMAGES DE LAPRAIRIE #1**

<b>Année</b>	<b>- de construction</b>	1995
	<b>- d'acquisition</b>	1998
<b>Observations visuelles</b>		
Type de fissure	1 ou 2 fissures longitudinales et en étoile	
Ouverture des fissures	Importante: entre 2 et 5 mm	
Poudre associée aux fissures	Intermédiaire	
Poudre associées aux joints		
Soulèvements	Perceptibles	
Porte du garage	Se ferme mal	
Fissures dans la fondation	Aucune	
2e étage au-dessus du garage	Oui	
Rentre la voiture dans le garage	A quelques reprises	
Lave la voiture dans le garage	Non	
Chauffe le garage l'hiver	5 °C	
Gouttières	S'égoutte près des fondations	
Terrain	Légèrement incliné vers la rue Surélevé à l'arrière	

**Positionnement des instruments de LaPrairie #1**

Les fissures observées dans le garage de LaPrairie #1 ont été cartographiées. L'ouverture des fissures a aussi été notée. La figure 6.16 montre la répartition des fissures et leur ouverture ainsi que la position des instruments installés.

La figure 6.17 montre la position du Fissuro-Logger et du Tell-Tale standard. Le Fissuro-Logger enregistre le soulèvement de la dalle à l'intersection de la fissure et du joint dalle-mur.

vue en plan

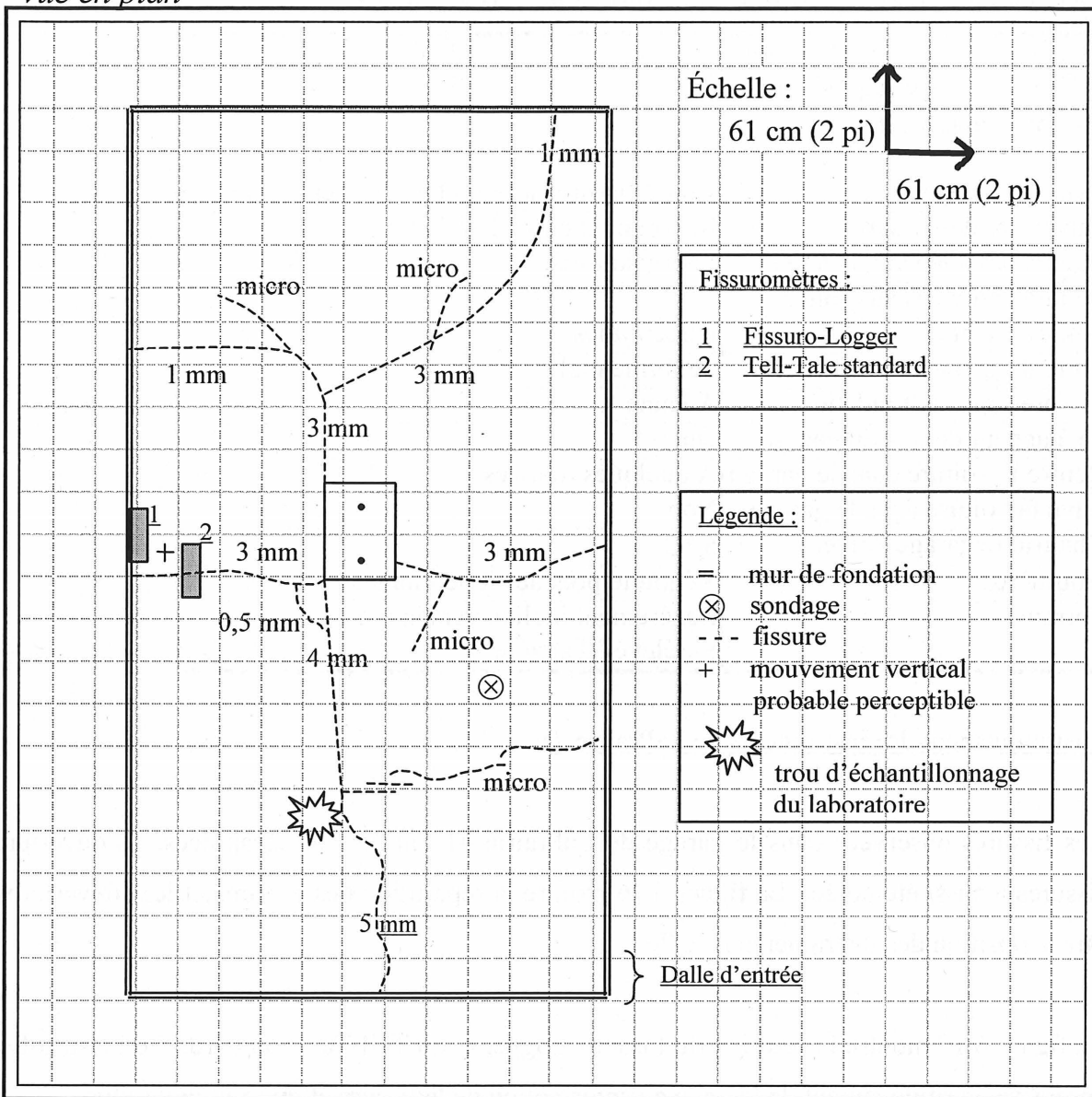
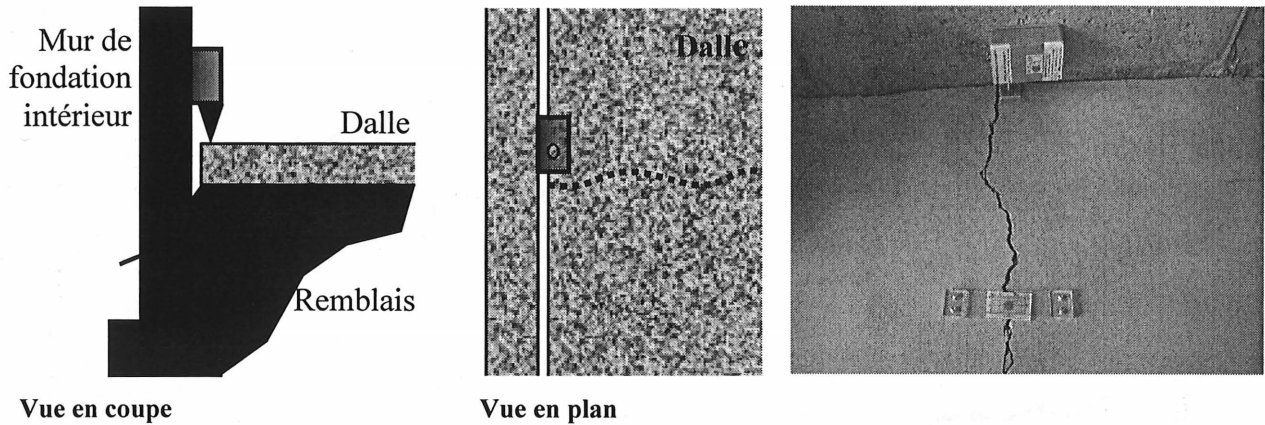


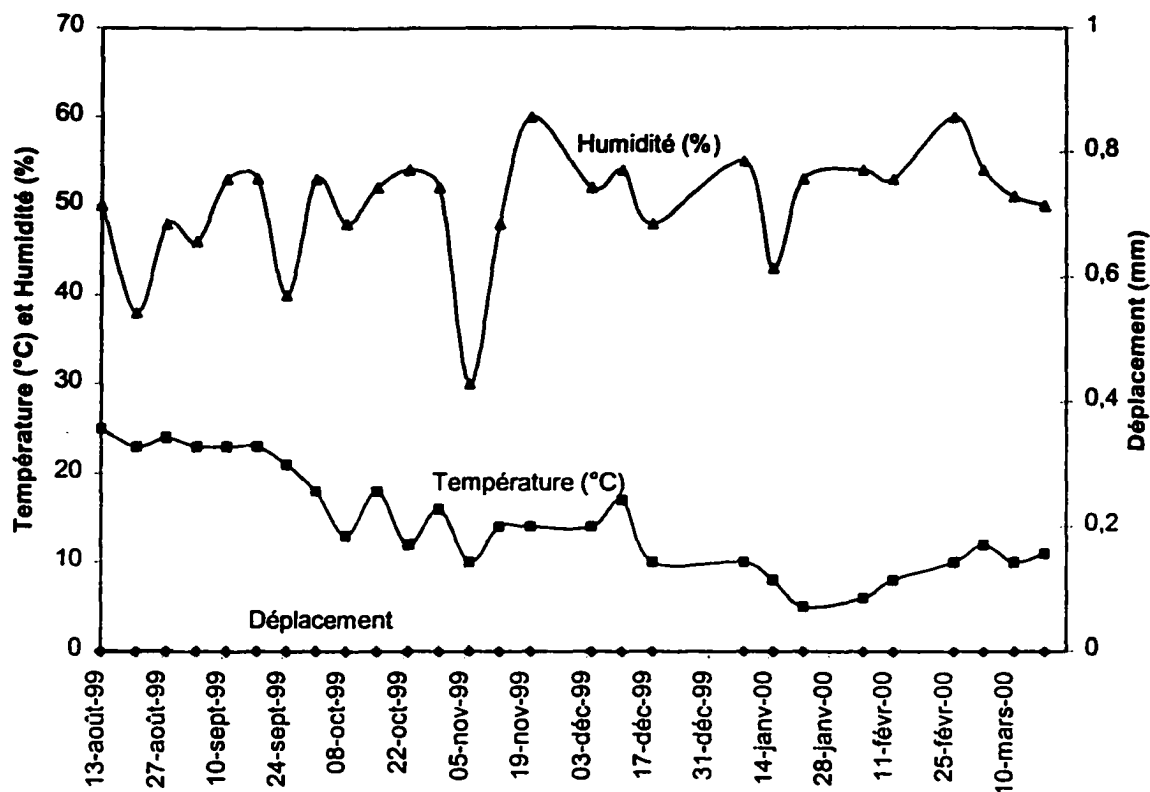
Figure 6.16 Cartographie des fissures et positionnement des instruments de LaPrairie #1



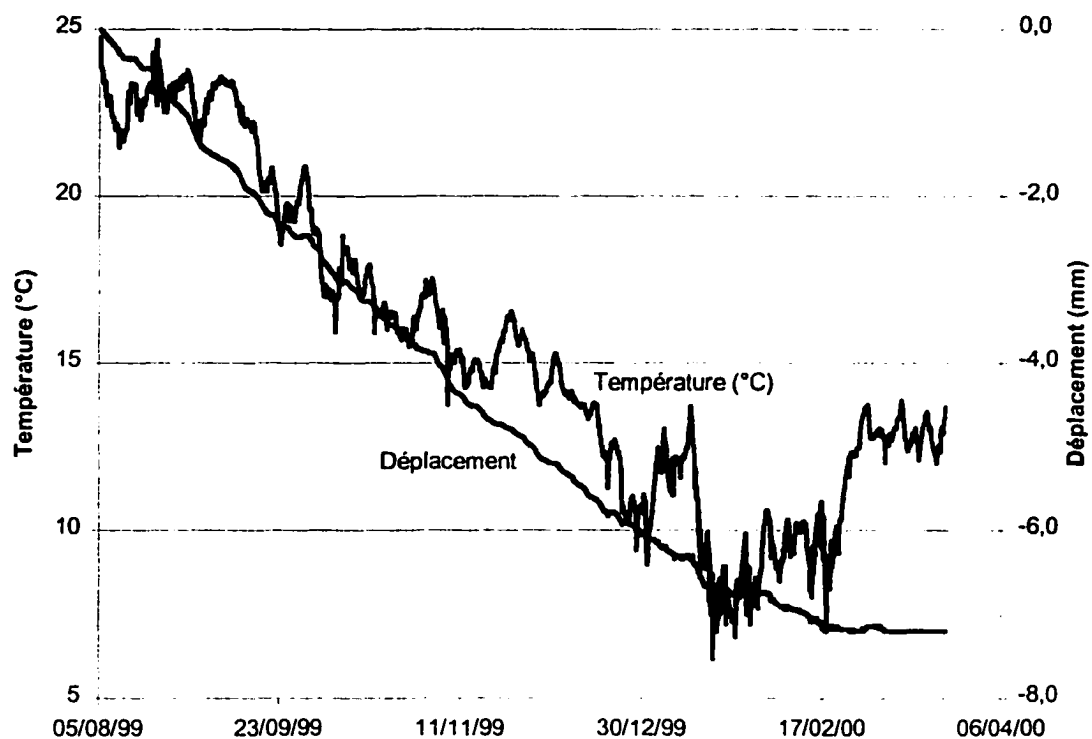
**Figure 6.17 Positionnement du Fissuro-Logger et du Tell-Tale standard de LaPrairie #1**

#### Résultats d'instrumentations de LaPrairie #1

Les figures 6.18 et 6.19 présentent les résultats d'instrumentation recueillis pour le garage LaPrairie #1 sous forme de graphique. La température et l'humidité notées par le propriétaire sont aussi illustrées à la figure 6.18. La courbe de température de la figure 6.19 est celle enregistrée par le Fissuro-Logger.



**Figure 6.18 LaPrairie #1 – Tell-Tale standard – Mesure l'ouverture de la fissure**



**Figure 6.19 LaPrairie #1 – Fissuro-Logger – Mesure du soulèvement de la dalle .**

## Analyse et interprétation de LaPrairie #1

Les deux instruments ont été installés quatre ans après la construction de la maison. Contrairement aux deux autres cas d'instrumentation étudiés précédemment, les deux instruments mesurent les mouvements de la même fissure. Le premier instrument est un fissuromètre Tell-Tale standard. Il mesure l'ouverture de la fissure à environ 30 cm du mur de fondation de côté relié à la maison. Le deuxième instrument est un Fissuro-Logger. Il mesure le soulèvement de la dalle d'un côté de la fissure à 1 cm du joint dalle-mur.

Les graphiques montrant les résultats d'instrumentation (figures 6.18 et 6.19) sont très différents l'un de l'autre. Celui mesurant l'ouverture de la fissure indique qu'il n'y a eu aucun mouvement durant les sept mois d'observation. Le graphique montrant le soulèvement de la dalle indique qu'il y a eu un mouvement de la dalle vers le haut de 7,2 mm. Le soulèvement de la dalle s'est fait de façon graduelle et indépendamment de la température et de l'humidité. On remarque que les dernières mesures se sont stabilisées à -7,2. En fait, la tige du fissuromètre avait atteint sa course maximale. Lors de la dernière prise de mesure, il était possible d'observer que la surface, du côté de la dalle où la mesure du soulèvement se faisait, était 4 mm plus élevée que la surface de l'autre côté de la fissure. Par contre, au niveau du fissuromètre Tell-Tale, la démarcation était de 1 mm. Cette démarcation de 1 mm peut expliquer l'absence de mouvement de l'ouverture de la fissure. En effet, les deux plaques formant le fissuromètre Tell-Tale étaient coincées par le mouvement vertical de l'une des deux plaques.

La démarcation entre les deux surfaces de chaque côté de la fissure est plus prononcée près du joint dalle-mur qu'à 30 cm de celui-ci. Il peut s'agir d'un phénomène de basculement de la dalle dont le point neutre (pivot) serait à moins d'un demi-mètre du mur de fondation. Ainsi, le soulèvement absolu pourrait être moindre que 7,2 mm. La réaction produisant le gonflement du remblai se poursuit encore à un rythme rapide. Par contre, les poussées du remblai sont plus élevées verticalement puisqu'apparemment, aucune poussée latérale n'a endommagé les murs de fondation. Les dommages sont donc d'ordre esthétique et non structural.

## 6.5 Étude de cas LaPrairie #2

### Historique et description des dommages de LaPrairie #2

L'apparition des dommages s'est faite graduellement depuis la construction de la maison. Les propriétaires ont déjà observé des monticules de poudre blanchâtre autour des fissures. Le terrain est un peu enfoncé autour des fondations arrières de la maison. Une rivière s'écoule derrière la maison. Le tableau 6.5 résume les observations.

**TABLEAU 6.5 DESCRIPTION DES DOMMAGES DE LA PRAIRIE #2**

<b>Année</b>	<b>- de construction</b>	1993
	<b>- d'acquisition</b>	1993
<b>Observations visuelles</b>		
Type de fissure	Plusieurs fissures en étoile	
Ouverture des fissures	Importante: entre 2 et 5 mm	
Poudre associée aux fissures	Rare	
Poudre associées aux joints		
Soulèvements	Perceptibles	
Porte du garage	Se ferme bien	
Fissures dans la fondation	Aucune	
2e étage au-dessus du garage	Non	
Rentre la voiture dans le garage	Non	
Lave la voiture dans le garage	Non	
Chauffe le garage l'hiver	Non	
Gouttières	S'égoutte près des fondations	
Terrain	Légèrement incliné vers la rue Surélevé à l'arrière	

### Positionnement des instruments de LaPrairie #2

Les fissures observées dans le garage de LaPrairie #2 ont été cartographiées. L'ouverture des fissures a aussi été notée. La figure 6.20 montre la répartition des fissures et leur ouverture ainsi que la position des instruments installés.

La figure 6.21 montre la position du Fissuro-Logger et du Tell-Tale de déplacement. Le Fissuro-Logger enregistre l'ouverture de la fissure.

vue en plan

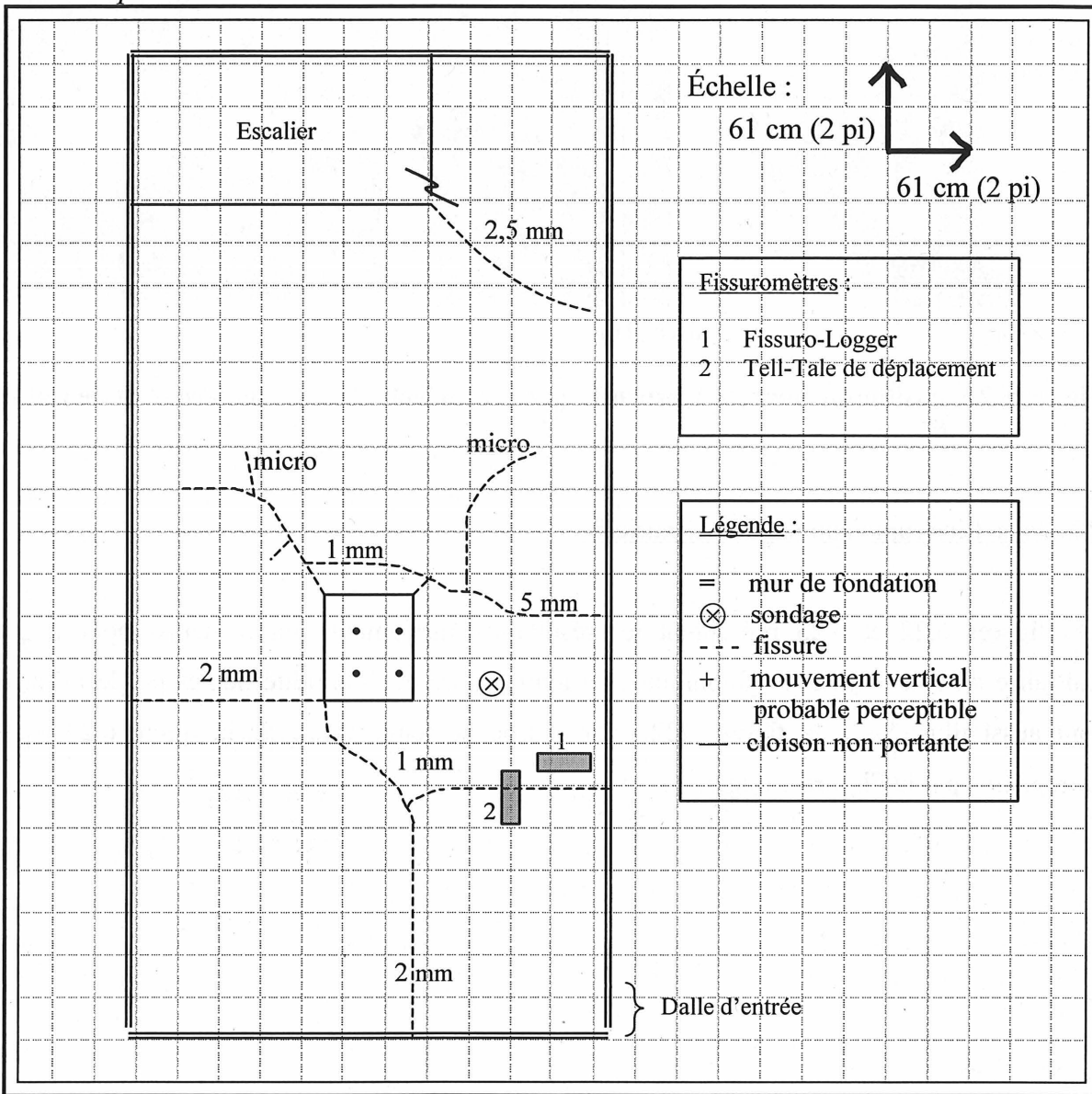
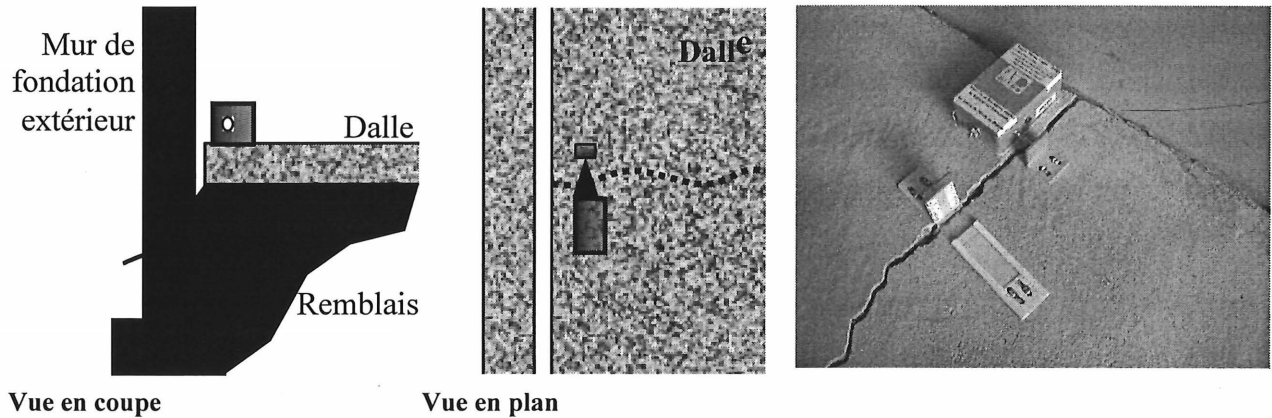


Figure 6.20 Cartographie des fissures et positionnement des instruments de LaPrairie #2

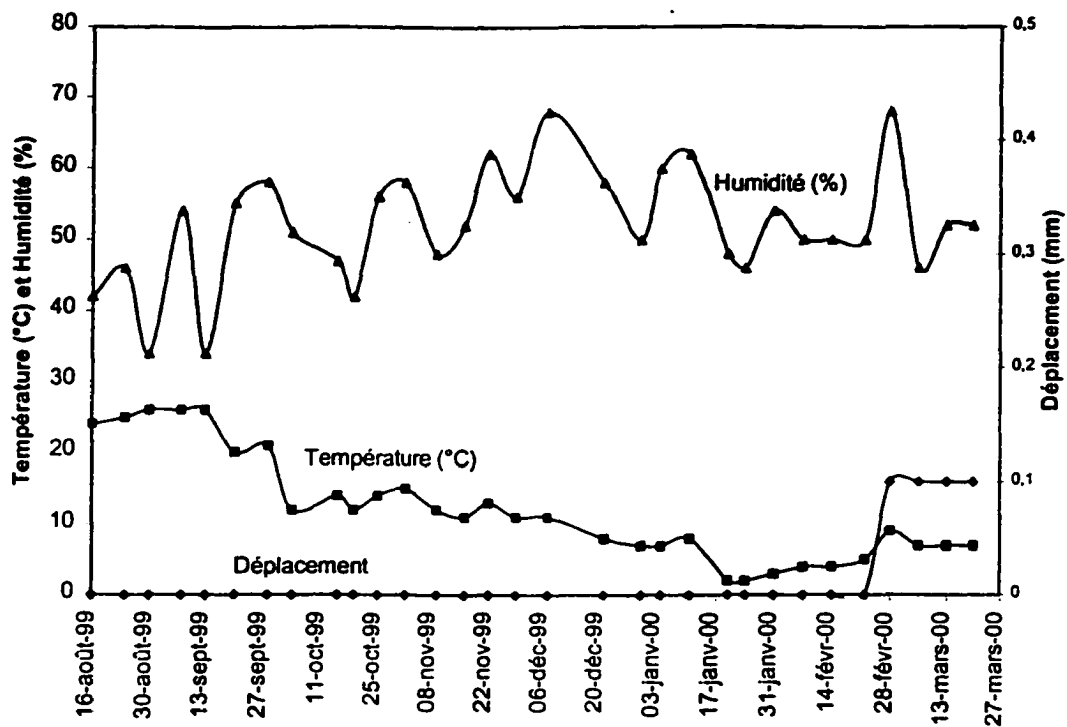


**Figure 6.21** Positionnement du Fissuro-Logger et du Tell-Tale de déplacement de LaPrairie #2

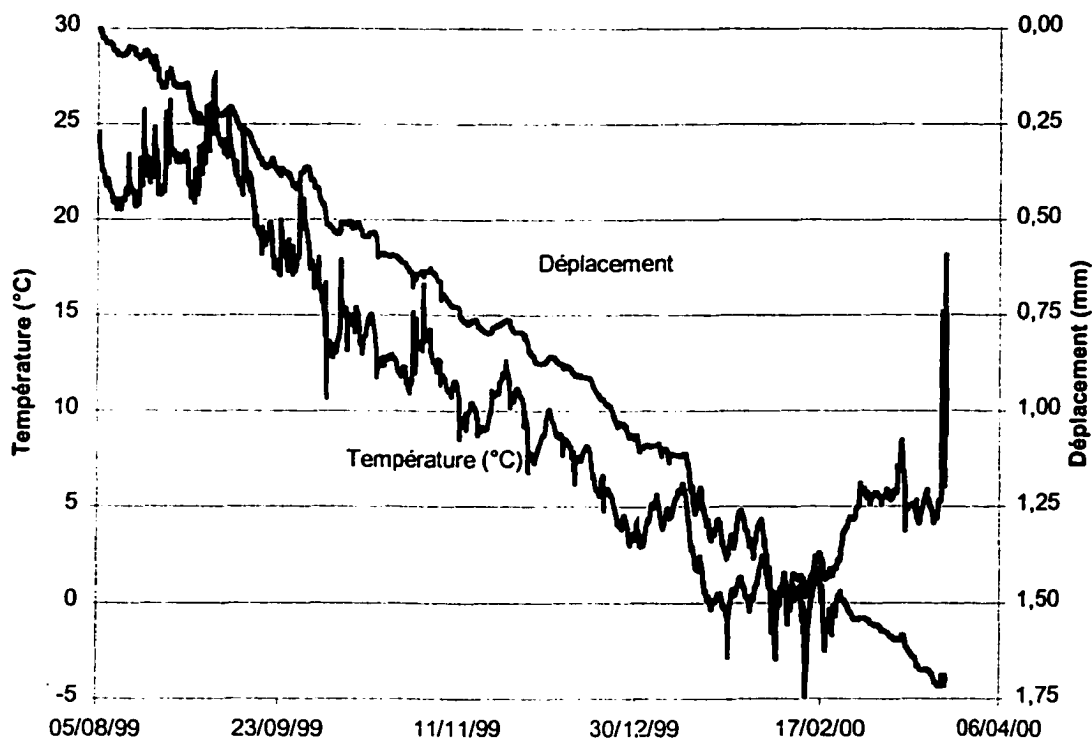
#### Résultats d'instrumentations de LaPrairie #2

Les figures 6.22 et 6.23 présentent les résultats d'instrumentation recueillis pour le garage LaPrairie #2 sous forme de graphique. La température et l'humidité notées par le propriétaire sont aussi illustrées à la figure 6.22. La courbe de température de la figure 6.23 est celle enregistrée par le Fissuro-Logger.





**Figure 6.22 LaPrairie #2 – Tell-Tale de déplacement – Mesure le soulèvement de la dalle**



**Figure 6.23 LaPrairie #2 – Fissuro-Logger – Mesure de l'ouverture de la fissure**

## Analyse et interprétation de LaPrairie #2

La maison avait 6 ans au début de l'étude d'instrumentation. Comme dans le cas précédent, deux instruments ont été installés sur la même fissure. Dans le cas présent, le fissuromètre Tell-Tale de déplacement mesure le soulèvement de la dalle au niveau de la fissure et le Fissuro-Logger mesure l'ouverture de la fissure. Sur les graphiques (figures 6.22 et 6.23), on peut voir que la dalle s'est soulevée d'un dixième de millimètre d'un côté de la fissure par rapport à l'autre côté et que la fissure s'est ouverte de 1,7 mm.

Il est normal que le soulèvement ne soit pas très prononcé car les deux sections du fissuromètre sont fixées sur la dalle. Il n'y a pas de section fixée sur un plan neutre. En fait, c'est la différence de soulèvement se produisant de chaque côté de la fissure qui est mesurée. Si la dalle se soulève de la même hauteur de chaque côté de la fissure, aucun soulèvement n'est mesuré.

L'ouverture de la fissure a beaucoup varié du 3 février 2000 au 23 février 2000. Elle a varié entre 1,42 mm et 1,75 mm. Cette oscillation n'est pas très bien expliquée. Elle peut provenir d'une perturbation extérieure. L'effet de la température dans le garage est très minime sur le changement de l'ouverture de la fissure. À la fin février, lorsque la température a commencé à augmenter, l'ouverture de la fissure a continué de s'ouvrir au même taux que lors des mois précédents (pente de la courbe constante). Il est possible d'observer une diminution de l'ouverture de la fissure lorsque la température augmente et un agrandissement de l'ouverture de la fissure lorsque la température baisse. Cette variation de l'ouverture de la fissure en fonction de la température est très faible et se reflète plus comme un «bruit de fond». La réaction se poursuit à un rythme faible à moyen au niveau de la fissure étudiée. Ici aussi, il n'y a aucune fissure dans les murs de fondation. Les dommages sont donc d'ordre esthétique et non structural.

## 6.5 Étude de cas Boucherville

### Historique et description des dommages de Boucherville

Les dommages ont commencé leur apparition deux ans après la construction. La première fissure s'est formée dans le mur de fondation extérieur. Elle a été colmatée plusieurs fois mais, elle a toujours refissuré. Puis, dans l'année qui a suivi, le mur de fondation intérieur a fissuré et plusieurs fissures sont aussi apparues dans la dalle de béton. L'entrée du garage a été en gravier les trois premières années puis, elle a été asphaltée. Une rivière s'écoule derrière la maison. Le tableau 6.6 résume les observations.

**TABLEAU 6.6 DESCRIPTION DES DOMMAGES DE BOUCHERVILLE**

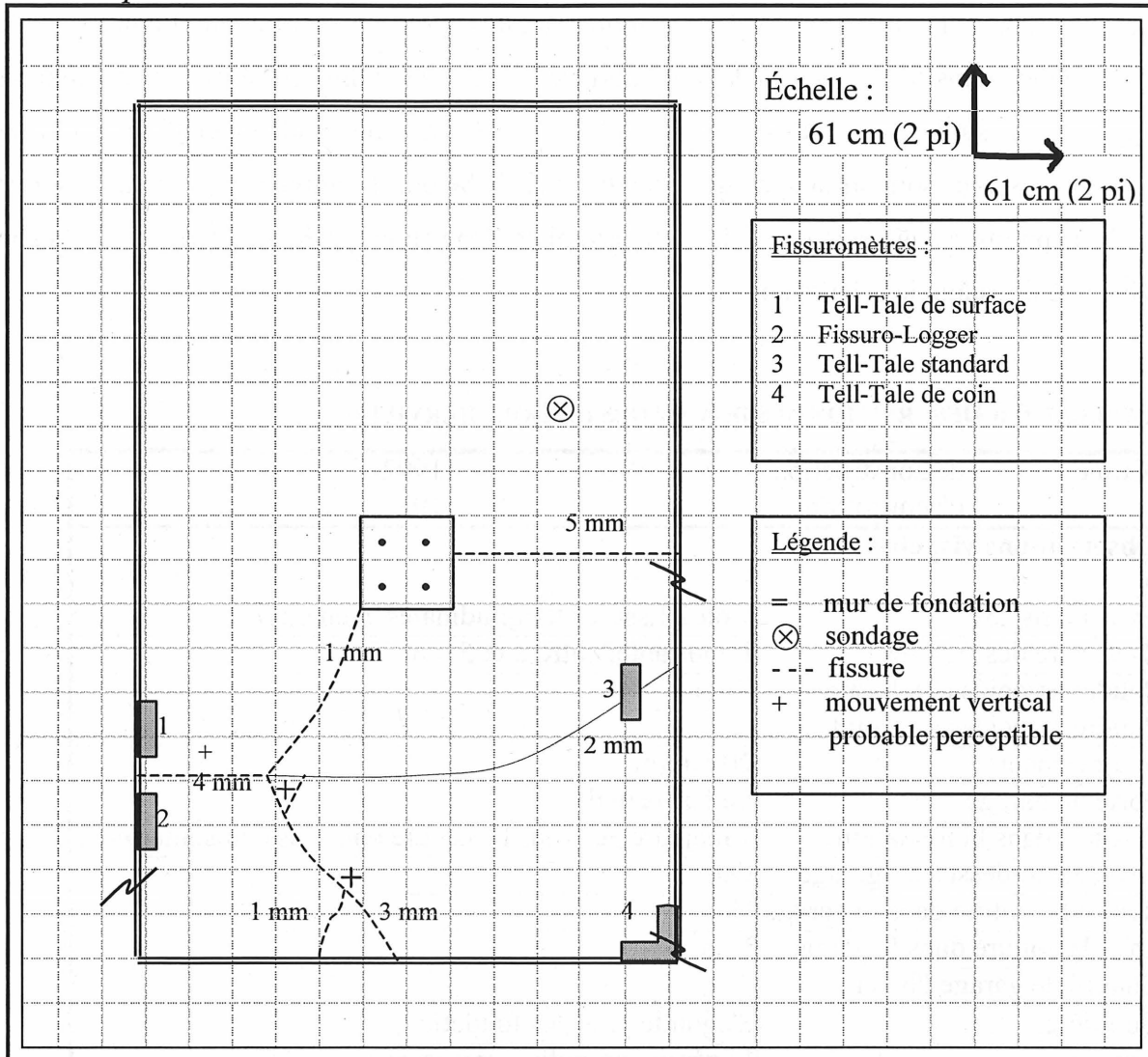
<b>Année</b>	<b>- de construction</b>	<b>1992</b>
	<b>- d'acquisition</b>	<b>1992</b>
<b>Observations visuelles</b>		
Type de fissure	1 ou 2 fissures longitudinales et en étoile	
Ouverture des fissures	Importante: entre 2 et 5 mm	
Poudre associée aux fissures	Rare	
Poudre associées aux joints		
Soulèvements	20 mm/m	
Porte du garage	Se ferme mal	
Fissures dans la fondation	1 majeure au coin, 1 majeure entre les coins intérieurs	
2e étage au-dessus du garage	Oui	
Rentre la voiture dans le garage	Non	
Lave la voiture dans le garage	Non	
Chauffe le garage l'hiver	5 °C	
Gouttières	S'égoutte près des fondations	
Terrain	Légèrement incliné vers la rue Surélevé à l'arrière	

### Positionnement des instruments de Boucherville

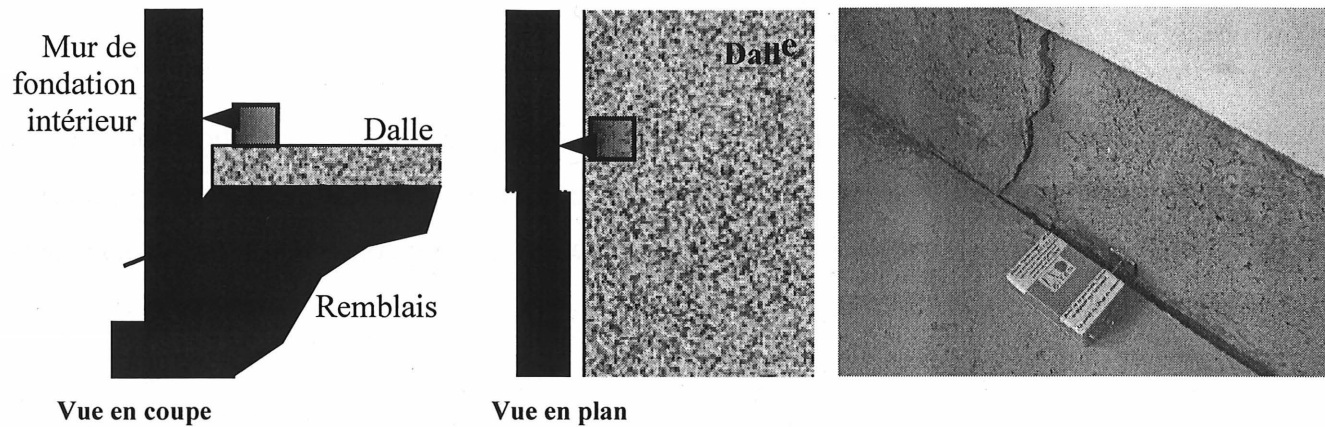
Les fissures observées dans le garage de Boucherville ont été cartographiées. L'ouverture des fissures a aussi été notée. La figure 6.24 montre la répartition des fissures et leur ouverture ainsi que la position des instruments installés.

La figure 6.25 montre la position du Fissuro-Logger. Celui-ci enregistre les déplacements du mur de fondation. Les figures 6.26, 6.27 et 6.28 montrent les photos des instruments installés.

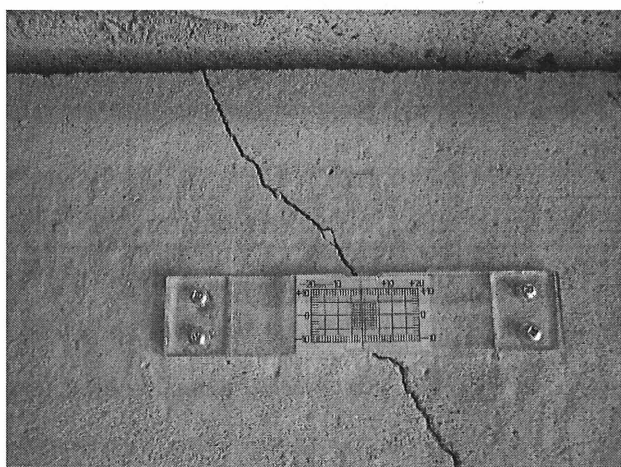
*vue en plan*



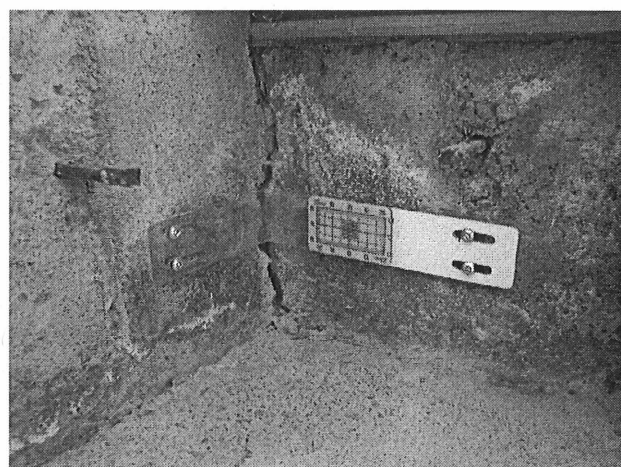
**Figure 6.24 Cartographie des fissures et positionnement des instruments de Boucherville**



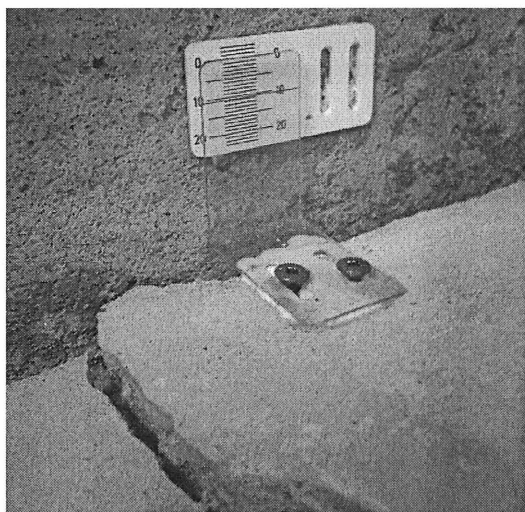
**Figure 6.25** Positionnement du Fissuro-Logger de Boucherville



**Figure 6.26** Tell-Tale standard



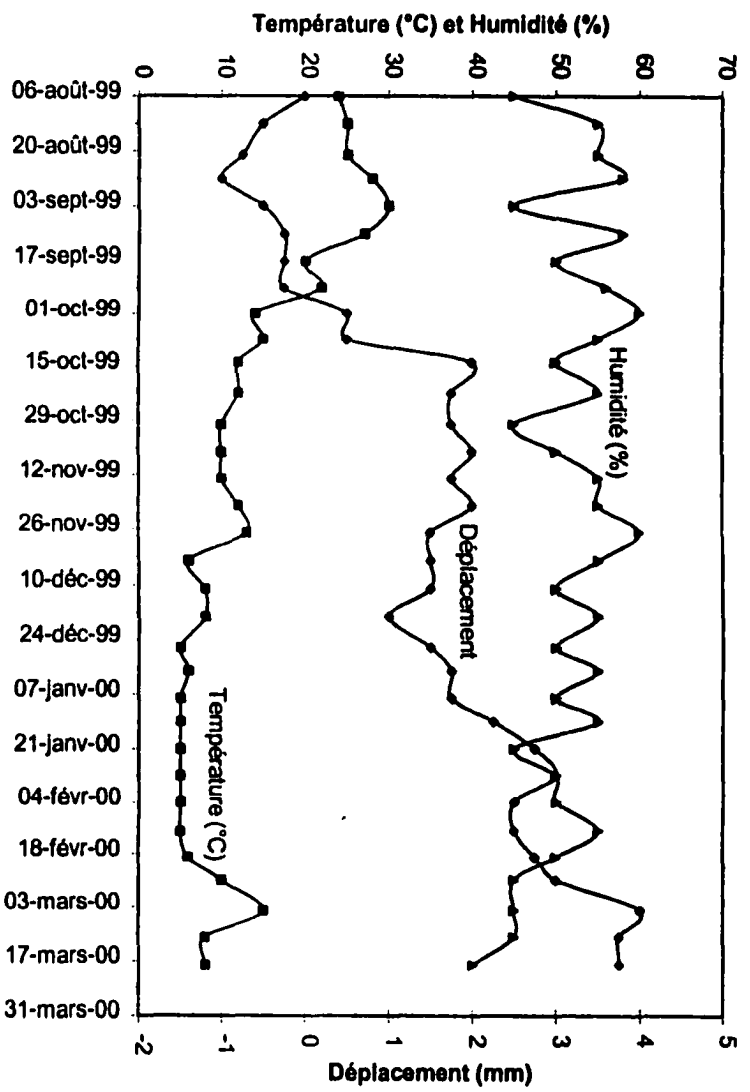
**Figure 6.27** Tell-Tale de coin



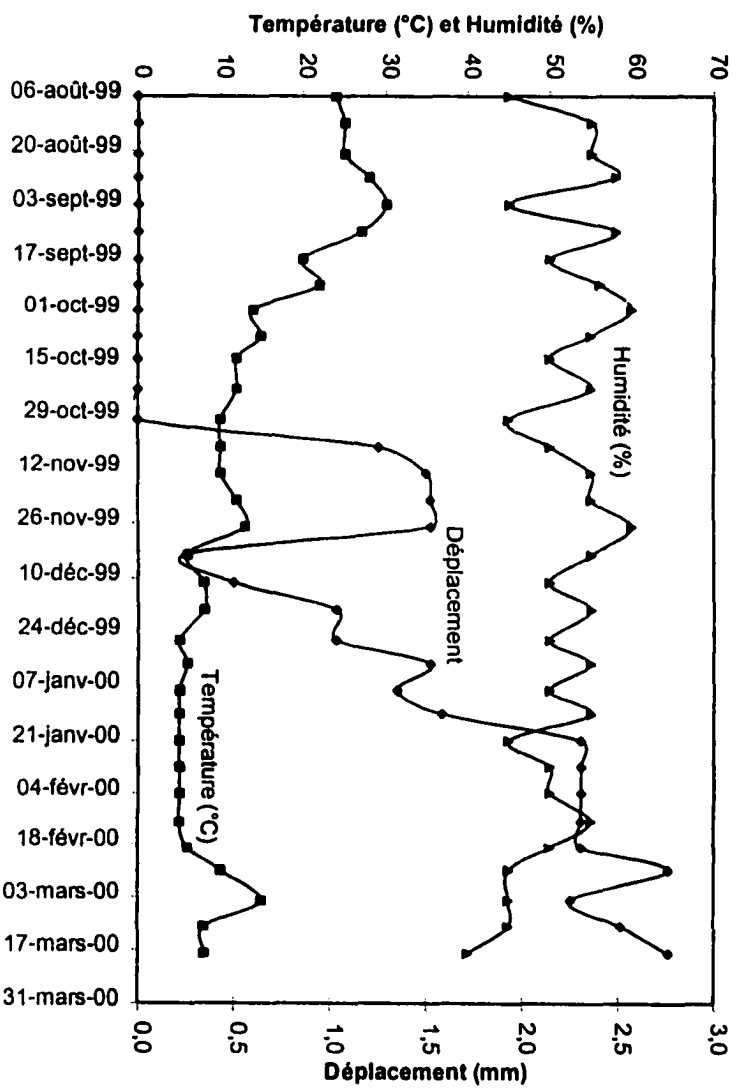
**Figure 6.28** Tell-Tale de surface

### **Résultats d'instrumentations de Boucherville**

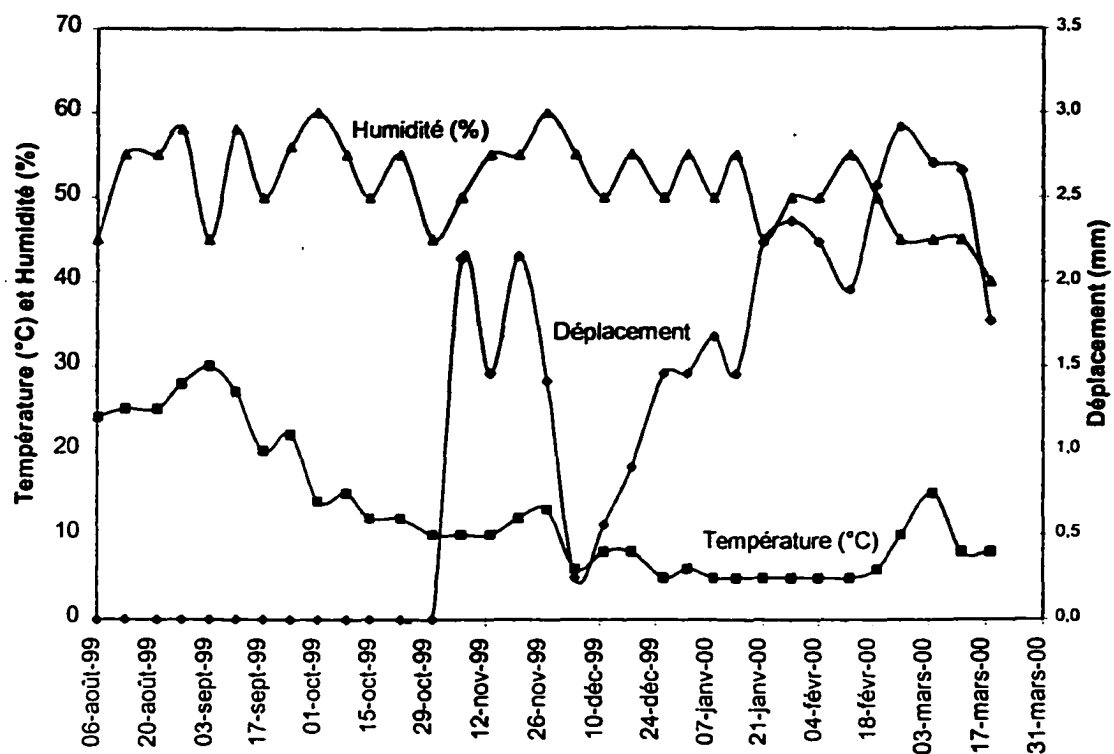
Les figures 6.29 à 6.32 présentent les résultats d'instrumentation recueillies pour le garage Boucherville sous forme de graphique. La température et l'humidité notées par le propriétaire sont aussi illustrées aux figures 6.29 à 6.31. La courbe de température de la figure 6.32 est celle enregistrée par le Fissuro-Logger.



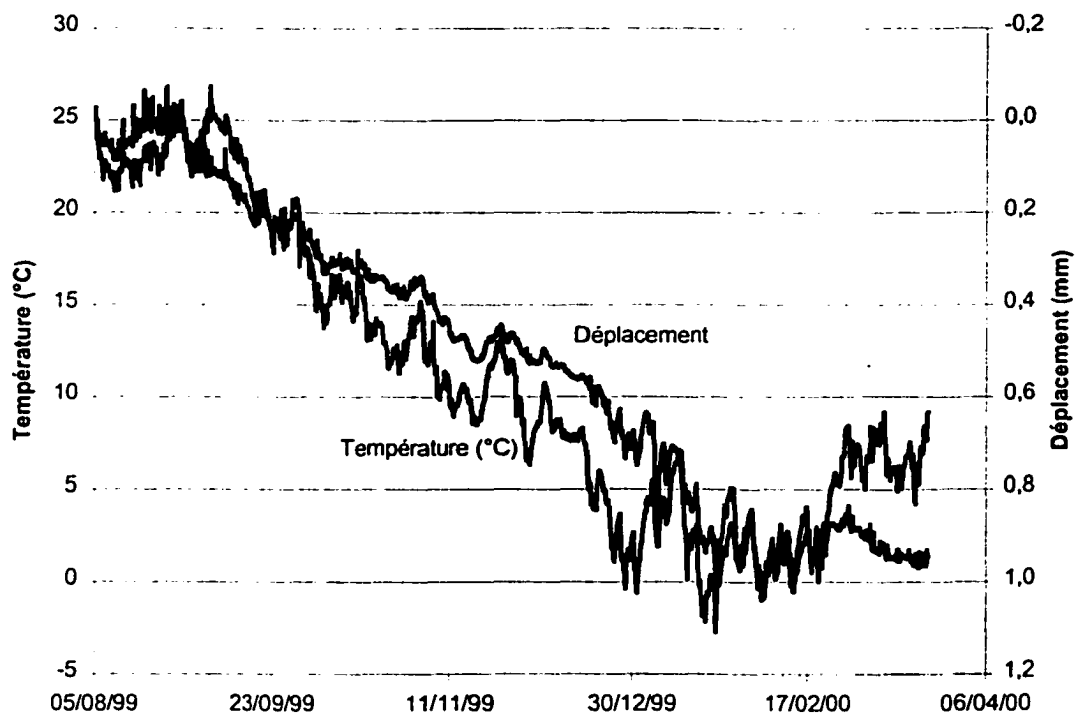
**Figure 6.29 Boucherville – Tell-Tale de surface – Mesure le soulèvement de la dalle**



**Figure 6.30 Boucherville – Tell-Tale standard – Mesure l'ouverture de la fissure**



**Figure 6.31 Boucherville – Tell-Tale de coin – Mesure le mouvement de la fondation**



**Figure 6.32 Boucherville – Fissuro-Logger – Mesure du déplacement du mur de fondation**



## Analyse et interprétation de Boucherville

La maison avait 7 ans lors du début de l'étude d'instrumentation. Les dommages étaient apparus 5 ans auparavant. Comparativement aux quatre autres garages étudiés, les dommages se situent seulement dans la moitié avant du garage. La partie arrière de la dalle est intacte. Les fissures dans les fondations se situent aussi à l'avant du garage. Ceci peut s'expliquer de diverses façons. Premièrement, il se peut que la pierre à l'arrière du garage soit différente de la pierre mise à l'avant du garage. Cela peut se produire si plus d'un voyage de pierre a été nécessaire pour remplir l'excavation. Par contre, le remplissage de l'excavation se fait normalement par couches compactées horizontalement et non par sections verticales. Deuxièmement, l'entrée de la maison était en gravier les trois premières années. Ceci a pu permettre un plus grand apport d'eau dans la partie avant du remblai. Ainsi, cette section du remblai aurait eu des conditions plus propices à l'oxydation de la pyrite et la réaction à cet endroit aurait été amorcée plus facilement. Mais, après sept ans, le remblai situé dans la partie arrière du garage aurait dû commencer à réagir puisque le remblai forme quand même un tout et que les conditions, à long terme, ne devraient pas varier énormément entre la partie avant et la partie arrière du garage. Troisièmement, les deux fissures se trouvant dans la dalle d'entrée auraient pu permettre l'entrée du gel et ainsi accentuer les dommages causés par le gonflement du remblai.

Cette maison possède les dommages les plus accentués des cinq maisons étudiées. Quatre instruments ont donc été installés : un Tell-Tale de surface, un de coin, un standard et un Fissuro-Logger. Les graphiques montrant les mouvements mesurés sont présentés aux figures 6.29 à 6.32. Près du mur de fondation intérieur, le soulèvement de la dalle est d'environ 4 mm en sept mois. L'ouverture de la fissure près du mur extérieur s'est accentuée d'environ 2,5 mm. La fissure au coin avant de la fondation a bougé d'environ 3 mm. Le mur de fondation intérieur a été déplacé d'environ 1mm.

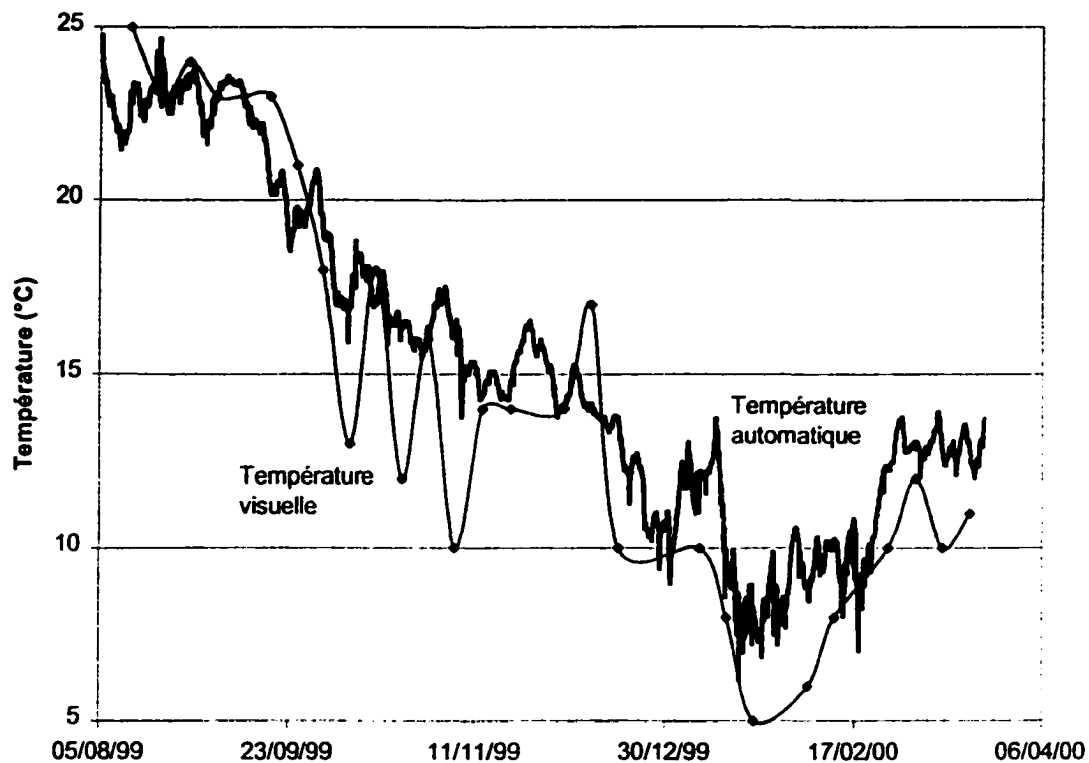
Il faut prendre en considération que le déplacement du mur de fondation intérieur a été influencé par l'effet de la température. Le fissuromètre est installé sur la dalle de béton pour mesurer le déplacement du mur de fondation. Ainsi, lorsque la dalle se contracte au froid, le fissuromètre enregistre la contraction de la demi-largeur de la dalle en plus des mouvements du mur de

fondation. Les mouvements du mur de fondation sont perceptibles lors des deux derniers mois de mesure. Effectivement, du 5 février au 28 février 2000, on observe une augmentation de température de 0°C à 8°C. Durant la même période de temps, le mur s'est déplacé de 0,15 mm. Par contre, lorsque la température s'est mise à osciller aux alentours de 7°C, le mur s'est redéplacé de 0,1 mm.

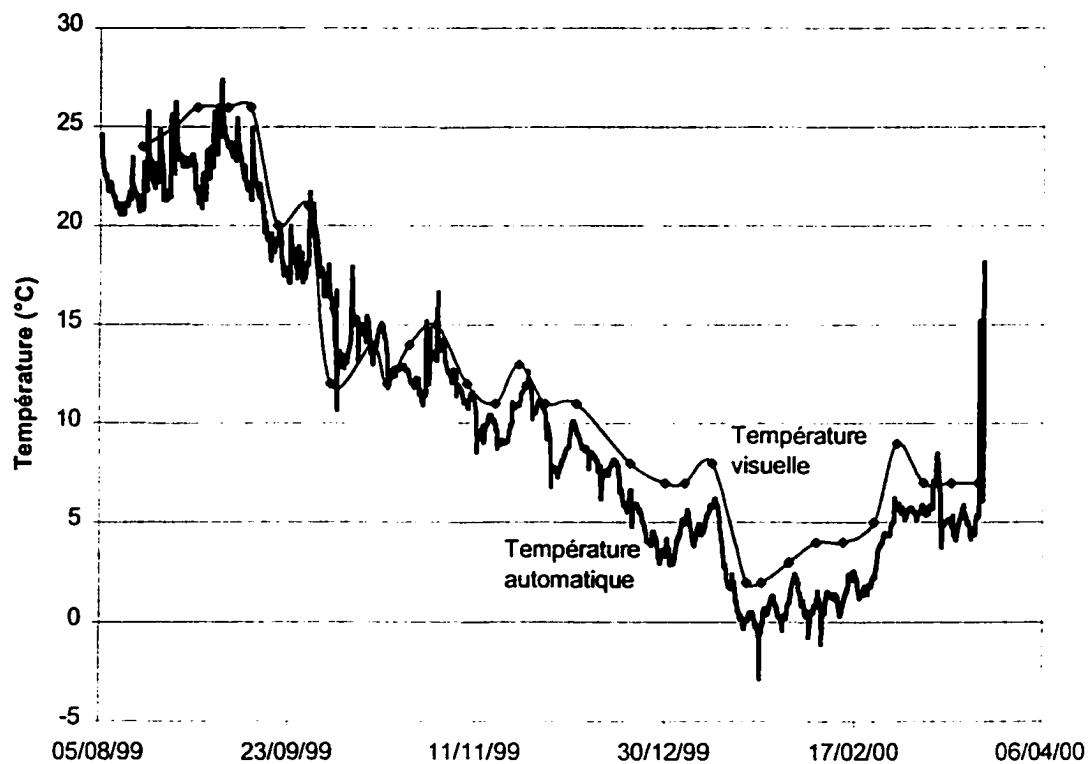
La réaction de gonflement se poursuit toujours à l'avant de la dalle de béton du garage. Son rythme de progression est de modéré à rapide. Les dommages sont d'ordre structural puisque les murs de fondation entourant le garage sont atteints par les poussées latérales et continuent de se déplacer.

## **6.6 Validation des résultats de température**

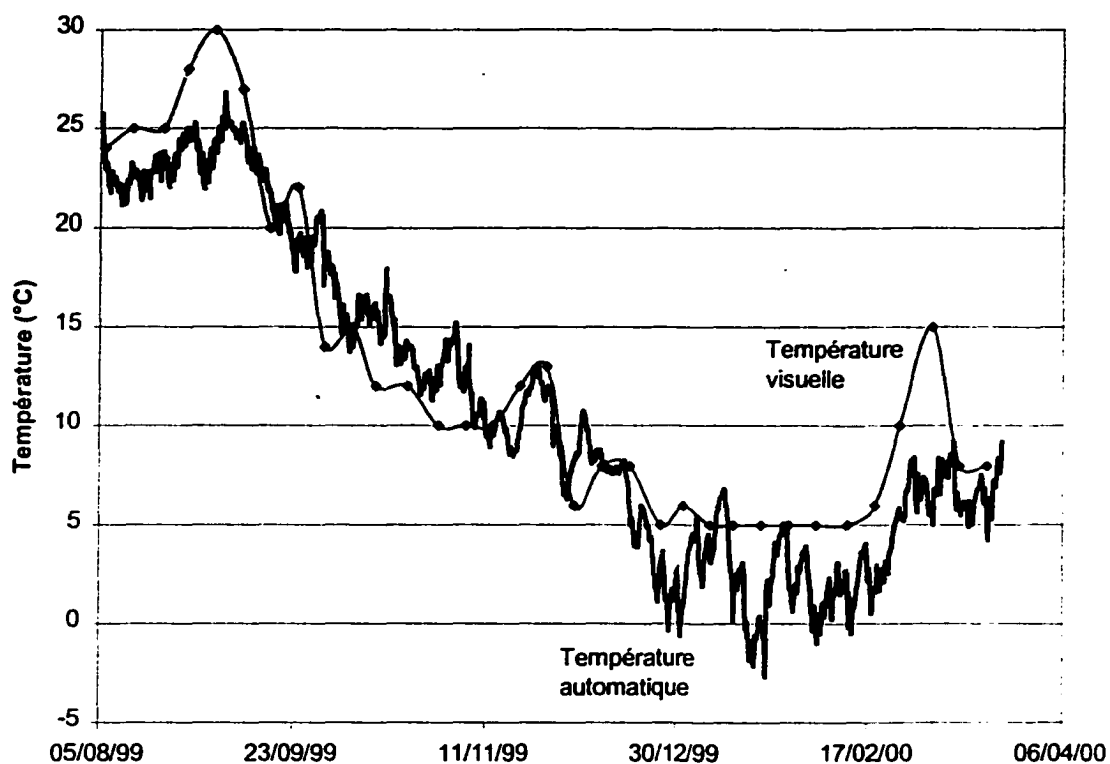
Il est possible de valider les mesures prises par les propriétaires en comparant les températures prises visuellement par ceux-ci avec la température enregistrée automatiquement toutes les deux heures par le Fissuro-Logger. Par conséquent, les mesures prises dans les garages de St-Bruno #1 et St-Bruno #2 ne peuvent pas être validées puisqu'il n'y avait pas de Fissuro-Logger installé à ces endroits. Les figures 6.33, 6.34 et 6.35 présentent les résultats.



**Figure 6.33 Comparaison des températures visuelles et automatiques de LaPrairie #1**



**Figure 6.34 Comparaison des températures visuelles et automatiques de LaPrairie #2**



**Figure 6. 35 Comparaison des températures visuelles et automatiques de Boucherville**

En général, les variations de température notées par le propriétaire sont relativement semblables à celles enregistrées par le Fissuro-Logger. Dans certains cas, les variations sont plus prononcées chez celles notées par le propriétaire. En règle générale, ces variations ne dépassent pas 5°C. Il ne faut pas oublier que la température d'un garage peut varier beaucoup l'hiver lorsque l'on ouvre et ferme la porte de garage. Les changements de température peuvent être brusques et de courte durée.

## **6.8 Discussions**

Le projet d'instrumentation a été réalisé dans cinq garages de bâtiments résidentiels. Les garages ont entre 4 et 19 ans. Ils présentent tous des dommages associés au gonflement du remblai. Les résultats d'instrumentation ont démontré que les réactions associées à l'oxydation de la pyrite étaient encore en cours dans les cinq remblais. Lors du passage des saisons, la variation de température dans le garage peut avoir un effet sur les déplacements enregistrés. Effectivement, lors d'un refroidissement de la température, le béton se contracte. Lors d'un réchauffement, le béton se dilate. Puisque les instruments étaient installés sur les dalles de béton et les murs de fondation, ils suivaient les mouvements de contraction et de dilatation du béton. L'instrumentation des dommages des cinq garages étudiés et atteints du problème de gonflement du remblai a donc pu permettre d'avoir une idée générale sur l'état de la réaction en cours. Elle a aussi pu permettre de connaître le rythme de progression du gonflement au point instrumenté. Le rythme peut être classé comme lent, modéré ou rapide. Les lectures ont été prises sur une période continue de sept mois. Les lectures devraient être poursuivies sur une plus longue période pour que celle-ci soit, au minimum, d'un an.



## **7 TENTATIVE DE MESURE DU POTENTIEL DE GONFLEMENT RÉSIDUEL DE TROIS (3) SITES INSTRUMENTÉS**

Parmi les cinq maisons instrumentées sur la Rive-Sud de Montréal, trois maisons ont été sélectionnées pour échantillonner le remblai du garage. Il s'agit des trois maisons où un Fissuro-Logger a été installé soit les deux résidences de la municipalité de LaPrairie et celle de la municipalité de Boucherville. Premièrement, une caractérisation du potentiel de gonflement des matériaux granulaires recueillis est faite. Deuxièmement, une partie des échantillons est soumise à un essai de gonflement résiduel accéléré.

### **7.1 Caractérisation des matériaux granulaires**

La méthodologie de caractérisation utilisée s'inspire de celle du protocole CTQ-M100, version 1.1, ainsi que de celle du protocole CTQ-M200, version 1.0. Tout d'abord, la méthode d'échantillonnage est décrite. Puis, une étude du béton est faite. Ensuite, l'analyse granulométrique est présentée suivie de l'examen pétrographique visuel servant à la détermination du nombre pétrographique et de l'indice pétrographique du potentiel de gonflement. Le tout est suivi des résultats d'analyses chimiques et de l'étude de lames minces.

#### **7.1.1 Échantillonnage**

L'échantillonnage du remblai est fait à l'aide d'une carotteuse électrique. Les trois forages sont réalisés à l'aide d'un carottier diamanté de 15,24 cm (6 pouces) de diamètre. Ils sont effectués loin des instruments déjà installés, pour ne pas affecter la prise de mesure, et à moins d'un mètre d'un mur de fondation de côté (intérieur ou extérieur) du garage. La carotte de béton est conservée pour examen. Plusieurs kilogrammes de remblais sont échantillonnés à la main, à la surface du forage sur environ le premier demi-mètre de profondeur. Le vide ainsi produit est rempli par de la pierre non réactive. Du béton est ensuite mis à la surface pour refermer le trou.

Il est important de noter que le remplacement de granulats réactifs par des granulats non réactifs à l'emplacement du forage peut annuler l'effet de gonflement ponctuel à cet endroit. Il était donc

important de bien choisir l'emplacement des forages loin des instruments pour ne pas affecter les réactions en cours dans le voisinage de l'instrument.

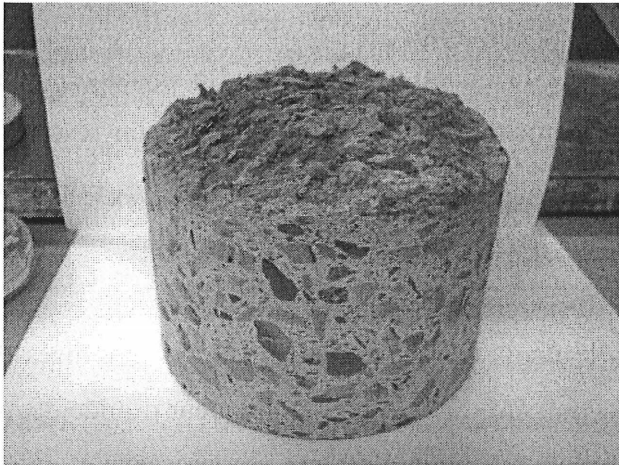
### 7.1.2 Étude du béton

Chacune des trois carottes de béton fait l'objet d'un examen visuel afin de déterminer sa qualité, son épaisseur, la présence de sulfatation et de décoloration etc. La description des trois carottes est donnée au tableau 7.1. Les figure 7.1, 7.2 et 7.3 montrent l'aspect du béton carotté.

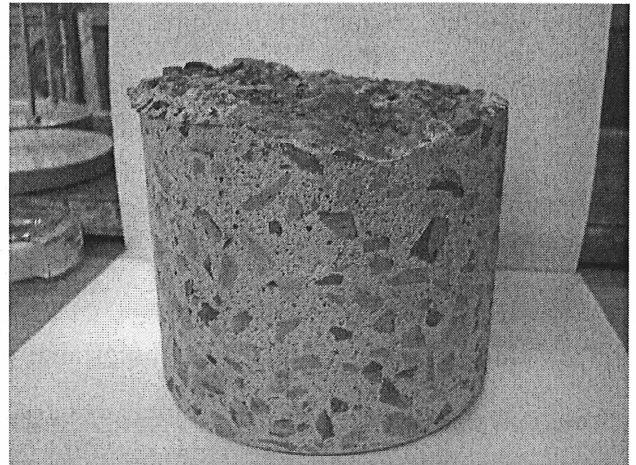
**TABLEAU 7.1 EXAMEN VISUEL DES ECHANTILLONS DE BETON**

<b>Observations</b>	<b>Localisation des résidences</b>		
	<b>LaPrairie #1</b>	<b>LaPrairie#2</b>	<b>Boucherville</b>
Qualité générale du béton	Bonne	Bonne	Bonne
Epaisseur (mm)	90	110	70 à 80
Revêtement	Peinture	Peinture	Aucun
Porosité du béton	-	Grande porosité; vide de 2 mm Ø	Grande porosité; vide de 5 mm Ø
Présence de :			
- sulfatation	Non	Très peu	Non
- oxydation	Non	Non	Non
- minéraux secondaires	Non	Non	Quelques cristaux sous la dalle
Etat des granulats du béton	Beaux	Beaux	Beaux
Base de la dalle	5 mm un peu jaunâtre	Bon état	Bon état
Présence d'un polythène	Non	Non	Non
Matériaux collés sous la dalle	Granulats du remblai et mini copeaux de bois	Un gros copeau de bois	-
Dessous de la dalle	Pointes des granulats du remblai un peu blanchâtre	-	-

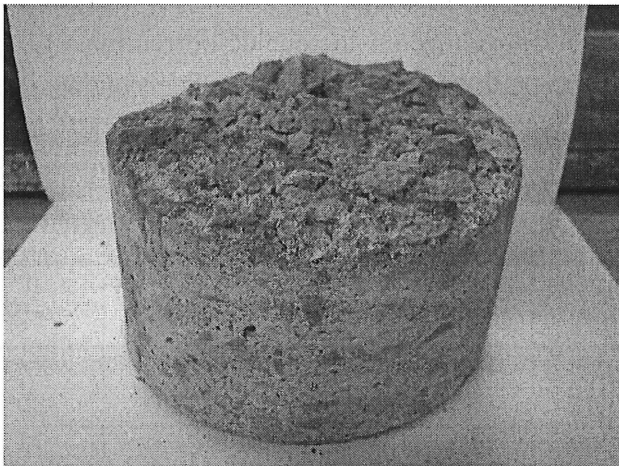




**Figure 7.1 Carotte de béton de LaPrairie #1**



**Figure 7.2 Carotte de béton de LaPrairie #2**



**Figure 7.3 Carotte de béton de Boucherville**

En plus, un essai sonique a été réalisé sur chaque carotte de béton pour faire une estimation de la qualité mécanique du béton. L'essai sonique est un essai normalisé (ASTM C597) non destructif. L'essai consiste à mesurer la durée de propagation d'une onde mécanique dans le béton. Il s'agit d'un essai simple et rapide.

La vitesse de propagation des ondes acoustiques dans le béton peut être affectée soit par la nature du milieu de propagation, soit par d'autres facteurs liés par exemple à la géométrie du milieu, à son état ou encore à la procédure d'essai. L'effet de la nature du milieu comprend le type de ciment, le rapport eau/ciment, le type de granulat et l'âge du béton.

L'effet du rapport eau/ciment sur la vitesse de propagation est très significatif. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'une augmentation de la quantité d'eau dans le mélange induit une diminution de la densité du mélange car la porosité est plus importante. Il en résulte que la vitesse de propagation est plus grande pour un mélange caractérisé par un rapport E/C faible que pour un mélange très fluide.

La taille des granulats est importante dans le choix de la fréquence des ondes émises dans le béton. La dimension maximale des granulats doit être inférieure à la longueur d'onde de manière à ce que la perte d'énergie lors de la propagation de l'onde n'affecte pas la précision du résultat. La résistance à la compression du béton aussi bien que la vitesse de propagation augmente en fonction de l'âge du béton. Les essais ont été réalisés à température ambiante soit à environ 20°C. Pour cette température, il n'est pas nécessaire d'introduire un facteur de correction. Le tableau 7.2 donne les caractéristiques des échantillons testés.

**TABEAU 7.2 CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS DE BETON POUR L'ESSAI SONIQUE**

Échantillon	Masse sèche (g)	M sss (g)	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	n (%)
LaPrairie #1	3098,6	3212,7	86,83	142,34	1382	2,24	83
LaPrairie #2	3694,6	3829,0	105,47	142,40	1680	2,20	80
Boucherville	2411,2	2491,1	68,86	142,53	1099	2,20	73

ρ : masse volumique

n : porosité

Le tableau 7.3 donne les vitesses et les caractéristiques dynamiques des échantillons de béton suite à l'essai sonique. La vitesse longitudinale (L) et transversale (T) est donnée par :  $V_{LT} = \text{longueur de l'échantillon} / \text{temps}_{(L,T)}$ . Le coefficient de Poisson dynamique (ν), le module de rigidité dynamique (G) et le module d'Young dynamique (E) sont calculés comme suit :

$$\nu = \frac{V_L - 2 \cdot V_T^2}{2 \cdot V_L - V_T^2} \quad G = \rho \cdot V_T^2 \quad E = \frac{2 \cdot G}{1 + \nu}$$

**TABLEAU 7.3 VITESSES ET CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES DES ECHANTILLONS DE BETON**

Echantillon	Oscilloscope (250 kHz)		$\nu$	G (GPa)	E (GPa)
	$V_L$ (m/s)	$V_T$ (m/s)			
LaPrairie #1	3126	2177	0,03	10,62	21,87
LaPrairie #2	3207	2109	0,12	9,79	21,90
Boucherville	3176	2190	0,05	10,52	22,04

$\nu$  : coefficient de Poisson dynamique

G : module de rigidité dynamique

E : module d'Young dynamique

Whitehurst [WHITEHURST, 1951], suggère de classer la qualité d'un béton ayant une densité de  $2400 \text{ kg/m}^3$  selon les cinq classes présentées au tableau 7.4.

**TABLEAU 7.4 CLASSIFICATION DE LA QUALITE DU BETON SELON L'ESSAI SONIQUE**

Vitesse longitudinale (m/s)	Qualité du béton
$V_L > 4500$	Excellent
$3500 < V_L < 4500$	Bon
$3000 < V_L < 3500$	Douteux
$2000 < V_L < 3000$	Pauvre
$V_L < 2000$	Très pauvre

Même si la densité des bétons étudiés varie entre  $2195$  et  $2243 \text{ kg/m}^3$ , il est quand même possible d'avoir une idée générale de la qualité du béton. Normalement, un béton moins dense est un béton plus poreux (pour des granulats de densité semblable). On s'attend donc à obtenir une vitesse plus faible dans un béton ayant une densité de  $2200 \text{ kg/m}^3$  que dans un béton ayant une densité de  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Les vitesses longitudinales mesurées par l'essai sonique sur les trois carottes de bétons étudiées sont de 3126, 3207 et 3176 m/s. Ainsi, selon le tableau 7.4, les trois carottes de béton ont une qualité douteuse [WHITEHURST, 1951]. Par contre, pour une dalle de béton d'un garage résidentiel, la qualité du béton obtenue est bonne puisque généralement, la résistance à la compression recherchée est de 25 MPa.

### **7.1.3 Analyses granulométriques des granulats du remblai**

Une analyse granulométrique est effectuée sur les trois échantillons de remblai provenant de bâtiments résidentiels sur la Rive-Sud de Montréal. La norme suivie est la NQ 2560-040. Tout d'abord, les échantillons, qui ont été mouillés par l'eau de forage, sont séchés au four.

Les trois échantillons à analyser sont des mélanges de gros granulats et de granulats fins. Le tamisage se fait donc en deux étapes. Le premier tamisage se fait manuellement avec les gros tamis de 28 mm, 20 mm, 14 mm et 10 mm sur l'ensemble de l'échantillon. Les parties retenues sur les quatre tamis sont pesées et notées. La partie passant le tamis 10 mm est récupérée pour le deuxième tamisage mécanique. Les petits tamis de 5 mm, 2,5mm, 1,25 mm, 630  $\mu\text{m}$ , 315  $\mu\text{m}$ , 160  $\mu\text{m}$  et 80  $\mu\text{m}$  sont utilisés. Le tamisage a une durée de 10 minutes. L'échantillon de LaPrairie#1 nécessite deux tamisages mécaniques. Les parties retenues sur les sept tamis, ainsi que le passant 80  $\mu\text{m}$ , sont pesées et notées.

Les résultats de chaque échantillon sont donnés sous forme de tableau (tableaux 7.5, 7.6 et 7.7) et de courbes granulométriques (figures 7.1, 7.2 et 7.3).

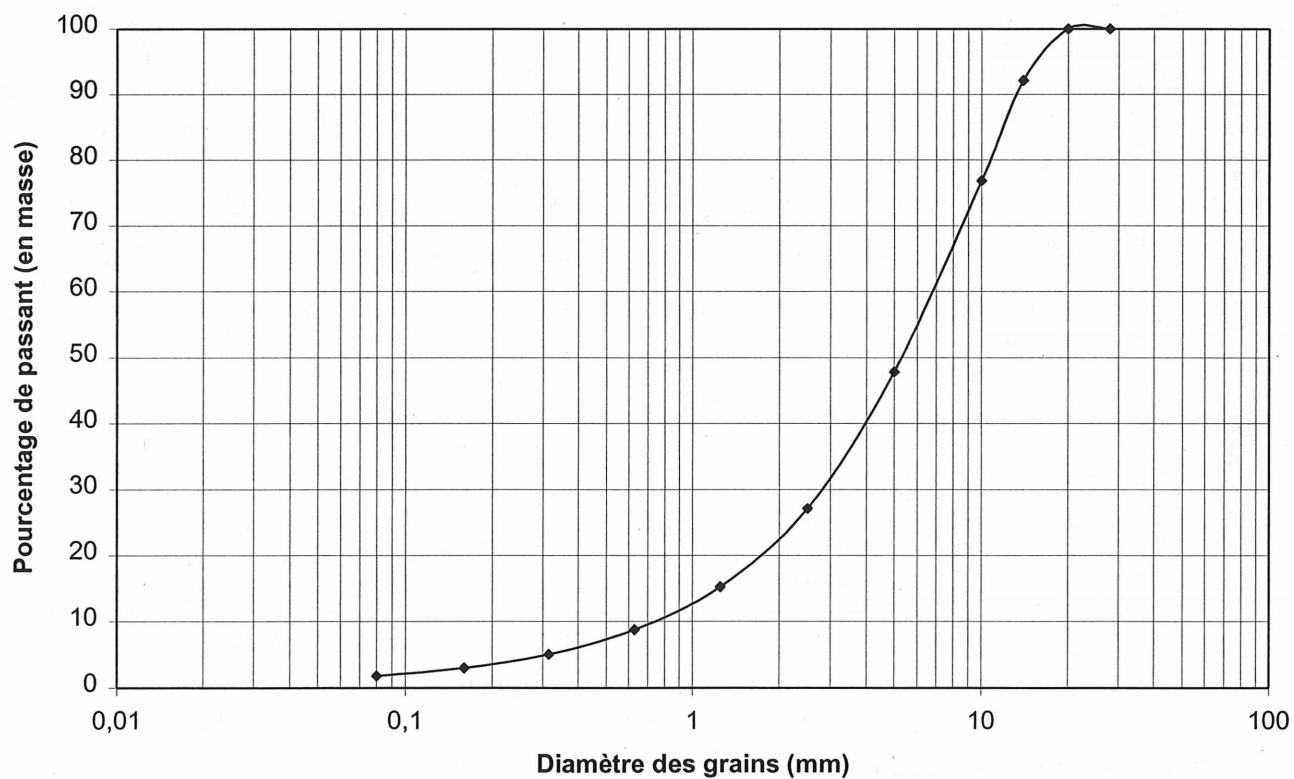
**TABEAU 7.5 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE L'ECHANTILLON LAPRAIRIE#1**

Tamis (mm)	Retenu (g)	Retenu cumulatif (g)	% cumulatif retenu	% cumulatif passant	Retenu total cumulatif (g)	% total passant
28	0	0	0	100,0	0	100,0
20	0	0	0	100,0	0	100,0
14	323,0	323,0	7,8	92,2	323,0	92,2
10	630,0	953,0	23,1	76,9	953,0	76,9
5	1198,0	1198,0	37,8	62,2	2151,0	47,9
2,5	855,3	2053,3	64,7	35,3	3006,3	27,1
1,25	491,1	2544,4	80,2	19,8	3497,4	15,2
0,630	266,0	2810,4	88,6	11,4	3763,4	8,8
0,315	154,4	2964,8	93,4	6,6	3917,8	5,0
0,160	83,2	3048,0	96,1	3,9	4001,0	3,0
0,080	50,4	3098,4	97,7	2,3	4051,4	1,8
0	74,3	3172,7	100,0	0	4125,7	0

Masse totale sèche avant tamisage : 4126,0 g

Masse cumulative des pesées : 4125,7 g

Validité de l'essai : 0,007% < 0,3% Accepté

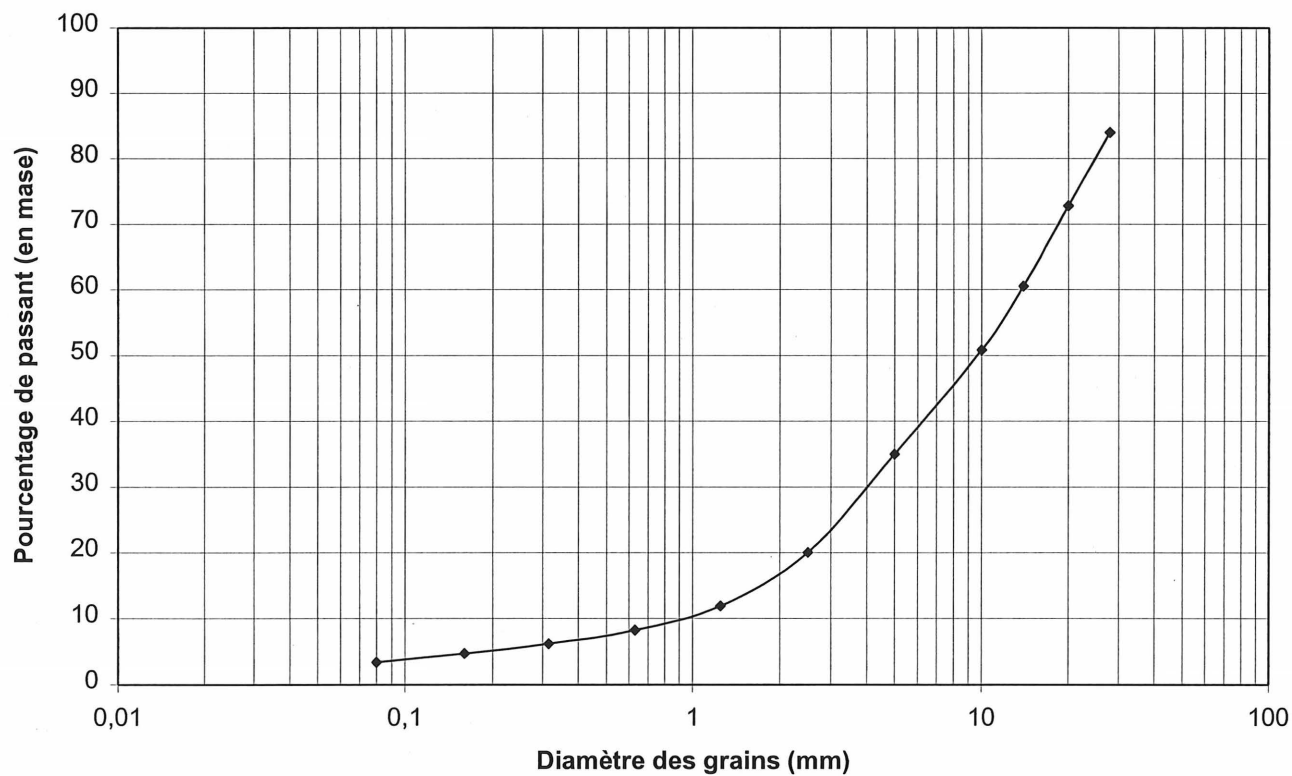


**Figure 7.4 Courbe granulométrique cumulative de LaPrairie#1**

**TABEAU 7.6 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE L'ECHANTILLON LAPRAIRIE#2**

Tamis (mm)	Retenu (g)	Retenu cumulatif (g)	% cumulatif retenu	% cumulatif passant	Retenu total cumulatif (g)	% total passant
28	558,6	558,6	16,0	84,0	558,6	84,0
20	392,3	950,9	27,2	72,8	950,9	72,8
14	427,8	1378,7	39,4	60,6	1378,7	60,6
10	341	1719,7	49,2	50,8	1719,7	50,8
5	553,4	553,4	31,2	68,8	2273,1	35,0
2,5	521,2	1074,6	60,5	39,5	2794,3	20,1
1,25	284,9	1359,5	76,6	23,4	3079,2	11,9
0,630	126,6	1486,1	83,7	16,3	3205,8	8,3
0,315	73,2	1559,3	87,8	12,2	3279,0	6,2
0,160	52,3	1611,6	90,8	9,2	3331,3	4,7
0,080	46,5	1658,1	93,4	6,6	3377,8	3,4
0	117,7	1775,8	100	0	3495,5	0

Masse cumulative des pesées : 3495,5 g



**Figure 7.5 Courbe granulométrique cumulative de LaPrairie#2**

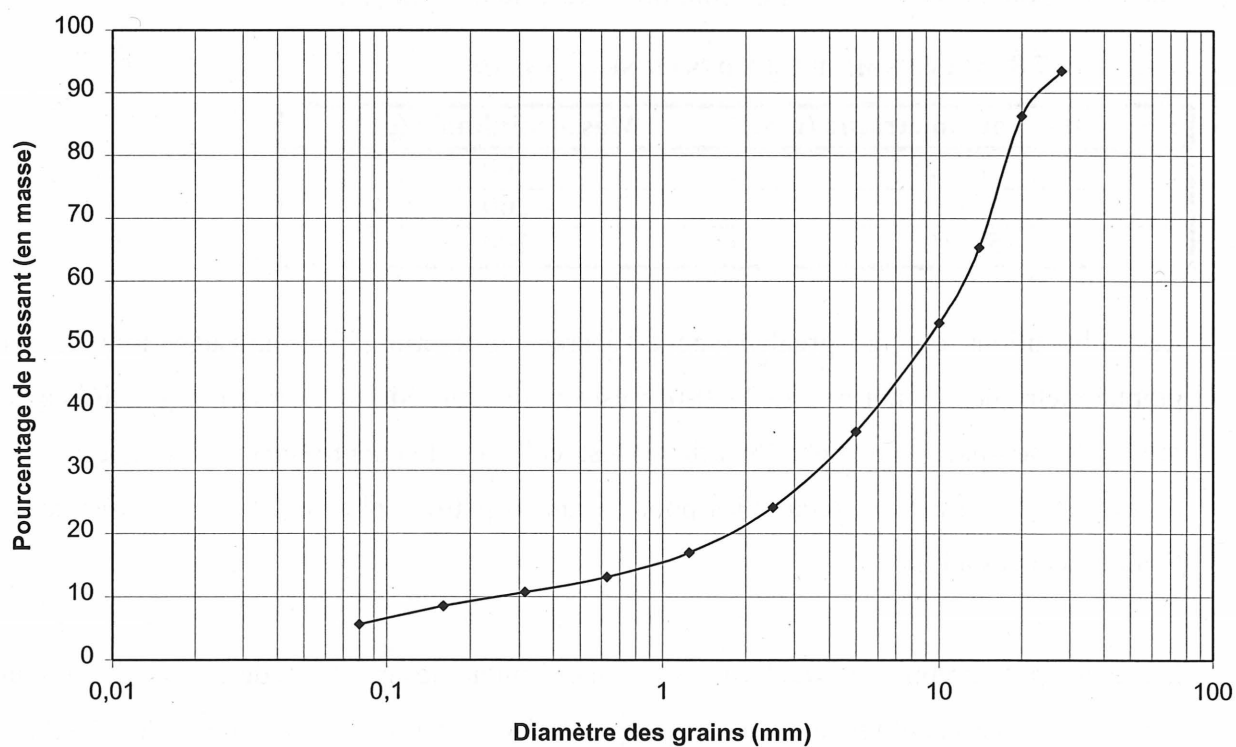
**TABEAU 7.7 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE L'ECHANTILLON BOUCHERVILLE**

Tamis (mm)	Retenu (g)	Retenu cumulatif (g)	% cumulatif retenu	% cumulatif passant	Retenu total cumulatif (g)	% total passant
28	296,8	296,8	6,5	93,5	296,8	93,5
20	327,2	624,0	13,6	86,4	624,0	86,4
14	959,0	1583,0	34,6	65,4	1583,0	65,4
10	548,5	2131,5	46,6	53,4	2131,5	53,4
5	789,2	789,2	32,3	67,7	2920,7	36,2
2,5	550,2	1339,4	54,8	45,2	3470,9	24,2
1,25	329,1	1668,5	68,2	31,8	3800,0	17,0
0,630	174,6	1843,1	75,4	24,6	3974,6	13,2
0,315	111,3	1954,4	79,9	20,1	4085,9	10,7
0,160	99,6	2054,0	84,0	16,0	4185,5	8,5
0,080	132,6	2186,6	89,4	10,6	4318,1	5,7
0	258,6	2445,2	100	0	4576,7	0

Masse totale sèche avant tamisage : 4582,1 g

Masse cumulative des pesées : 4576,7 g

Validité de l'essai :  $0,12\% < 0,3\%$  Accepté



**Figure 7.6 Courbe granulométrique cumulative de Boucherville**

#### **7.1.4 Analyses pétrographiques des granulats du remblai**

Une analyse pétrographique est effectuée sur les trois échantillons de remblai provenant de bâtiments résidentiels sur la Rive-Sud de Montréal. La procédure suivie est celle du Comité Technique Québécois soit la Méthodologie de caractérisation du potentiel de gonflement des matériaux granulaires (CTQ-100), version 1.1 d'avril 1999. Elle comprend un examen pétrographique visuel, la détermination du nombre pétrographique (NP) ainsi que de l'indice pétrographique du potentiel de gonflement (IPPG).

Les échantillons étudiés sont des matériaux de granulométrie étendue (voir analyse granulométrique). Ainsi, l'analyse est réalisée sur les fractions 5/10, 10/14 et 14/20 mm. Toutefois, la fraction passant le tamis 5,0 mm est conservée, mais n'est pas considérée pour le calcul du nombre pétrographique et de l'IPPG. Les masses minimales à utiliser lors de la détermination du NP et de l'IPPG sont présentées au tableau 7.8.

**TABLEAU 7.8 MASSES MINIMALE DES PRISES D'ESSAIS**

<b>Fraction granulométrique (mm)</b>	<b>Masse minimale (g)</b>
14 – 20	500
10 – 14	200
5 – 10	100

Les échantillons ont été préalablement séparés en fraction, par tamisage, lors de l'analyse granulométrique. La norme NQ 2560-015 est suivie pour réduire les fractions étudiées à la masse minimale permise. La méthode utilisée est celle de l'échantillonneur mécanique avec plat déverseur. Les fractions recueillies pour l'examen pétrographique visuel sont ensuite lavées à l'eau et séchées à l'air.

L'examen pétrographique visuel est réalisé en examinant les granulats de chaque fraction un à un. Les outils utilisés sont un couteau, une loupe, du HCl à 10% et un sous noir. Une description de la pierre est faite. Un nom est attribué à chaque granulat. Ensuite, chaque catégorie de granulat de chaque fraction est pesée. Pour chaque catégorie de granulat, un facteur de NP est attribué selon la norme BNQ 2560-900 et facteur d'IPPG est donné suivant la méthodologie de



caractérisation mentionnée précédemment. Le tableau 7.9 résume les NP et les IPPG de chaque échantillon.

**TABLEAU 7.9 NP ET IPPG DE CHAQUE ECHANTILLON**

<b>Échantillon</b>	<b>NP</b>	<b>IPPG</b>
<b>LaPrairie#1</b>	<b>600</b>	<b>100</b>
<b>LaPrairie#2</b>	<b>581</b>	<b>94</b>
<b>Boucherville</b>	<b>280</b>	<b>36</b>

Les tableaux 7.10, 7.12 et 7.14 donnent le détail de l'examen pétrographique visuel de chaque échantillon tandis que les tableaux 7.11, 7.13 et 7.15 présentent les facteurs utilisés dans le calcul du nombre pétrographique et de l'IPPG de chaque échantillon.

**TABLEAU 7.10 EXAMEN PETROGRAPHIQUE VISUEL DE L'ECHANTILLON LAPRAIRIE #1**

<b>Description de la pierre:</b>	<b>Qté</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>2,5</b>	<b>&lt; 2,5</b>	<b>Total</b>
Shale noir, mou, friable	g	289,2	188,6	101,3	28,2	21,2	628,5
	%	89,5 (289,5/323)	90,0 (188,6/209,5)	93,6 (101,3/108,2)	100 (28,2/28,2)	100 (21,2/21,2)	91,1 (628,5/690,1)
Shale gris pâle, de dureté faible à mou, un peu friable	g	33,8	20,9	6,9	0	0	61,6
	%	10,5 (33,8/323)	10,0 (20,9/209,5)	6,4 (6,9/108,2)	0	0	8,9 (61,6/690,1)
Masse totale	g	323,0	209,5	108,2	28,2	21,2	690,1
	%	46,8 (323/690,1)	30,4 (209,5/690,1)	15,7 (108,2/690,1)	4,1 (28,2/690,1)	3,1 (21,2/690,1)	100 (690,1/690,1)
<b>Observations</b>	Plaque d'oxydation sur plusieurs granulats. Quelques cristaux de gypse répartis entre les granulats						

**TABLEAU 7.11 CALCUL DU NP ET DE L'IPPG DE LAPRAIRIE#1**

<b>Description de la pierre:</b>	<b>%</b>	<b>Facteur</b>	<b>NP</b>	<b>Facteur</b>	<b>IPPG</b>
Shale noir, mou, friable	90,4	6	542,3	1	90,4
Shale gris pâle, de dureté faible à mou, un peu friable	9,6	6	57,7	1	9,6
<b>Résultats</b>	<b>100</b>		<b>600</b>		<b>100</b>

**TABLEAU 7.12 EXAMEN PETROGRAPHIQUE VISUEL DE L'ECHANTILLON LAPRAIRIE#2**

Description de la pierre:	Qté	14	10	5	2,5	< 2,5	Total
Shale noir, mou très friable	g	378,2	207,3	97,0	27,0	25,5	735,0
	%	88,4	97,1	92,7	98,5	100	92,0
Calcaire microcristallin gris pâle, dureté moyenne-faible	g	10,5	0	0	0	0	10,5
	%	2,5	0,0	0,0	0,0	0	1,3
Shale gris-brun, dureté faible, légèrement friable	g	19,9	4	4,6	0,2	0	28,7
	%	4,7	1,9	4,4	1	0	3,6
Roche intrusive noire dureté moyenne à dure	g	19,2	2,2	3	0,2	0	24,6
	%	4,5	1	2,9	1	0	3,1
Masse totale	g	427,8	213,5	104,6	27,4	25,5	798,8
	%	53,6	26,7	13,1	3,4	3,2	100
Observations:	<p>L'échantillon retenu au tamis 14 mm s'est beaucoup effrité lorsqu'il a été vidé, après séchage, dans le plateau pour examen pétrographique.</p> <p>Les autres échantillons aussi mais de moins en moins plus l'échantillon était fin.</p> <p>Quelques cristaux de gypse répartis en surface et dans les interlits.</p> <p>Tâches d'oxydation.</p> <p>Quelques granulats sont très altérés (grande oxydation et cristallisation de gypse abondante).</p>						

**TABLEAU 7.13 CALCUL DU NP ET DE L'IPPG DE LAPRAIRIE#2**

Description de la pierre:	%	Facteur	NP	Facteur	IPPG
Shale noir, mou très friable	91,5	6	549,0	1	91,5
Calcaire microcristallin gris pâle, dureté moyenne-faible	1,4	3	4,2	0	0
Shale gris-brun, dureté faible, légèrement friable	3,8	6	22,9	0,75	3
roche intrusive noire dureté moyenne à dure	3,3	1,5	4,9	0	0
Résultats	100		581		94

**TABEAU 7.14 EXAMEN PETROGRAPHIQUE VISUEL DE L'ECHANTILLON BOUCHERVILLE**

Description de la pierre:	Qté	14	10	5	2,5	< 2,5	Total
Shale noir, mou, très friable	g	184,3	79,1	32,6	12,3	25,2	333,5
	%	35,8	38,6	32,2	46,9	100	38,2
Syénite blanche et noire, très dure	g	277,3	113,4	57,1	12,3		460,1
	%	53,9	55,3	56,5	46,9	0	52,7
Roche vert pâle à foncé, très dure (zone de contact)	g	30,9	6,8	1,3	0		39
	%	6,0	3,3	1,3	0	0	4,5
Roche tachetée gris pâle et blanc, très dure (syénite)	g	8,2	0	2,7	0		10,9
	%	1,6	0	2,7	0	0	1,2
Roche blanche, très dure (zone de contact)	g	6,4	5,8	7,0	1,6		20,8
	%	1,2	2,8	6,9	6,1	0	2,4
Roche noire, dure, litage (shale recuit)	g	7,8	0	0,4	0		8,2
	%	1,5	0	0,4	0	0	0,9
Masse totale	g	514,9	205,1	101,1	26,2	25,2	872,5
	%	59,0	23,5	11,6	3,0	2,9	100
Observations	Shale noir oxydé. Présence de plusieurs cristaux de gypse sur les granulats de shale.						

**TABEAU 7.15 CALCUL DU NP ET DE L'IPPG DE BOUCHERVILLE**

Description de la pierre:	%	Facteur	NP	Facteur	IPPG
Shale noir, mou, très friable	36,0	6	216,3	1	36,0
Syénite blanche et noire, très dure	54,5	1	54,5	0	0
Roche vert pâle à foncé, très dure (zone de contact)	4,7	1	4,7	0	0
Roche picotée gris pâle et blanc, très dure (syénite)	1,3	1	1,3	0	0
Roche blanche, très dure (zone de contact)	2,3	1	2,3	0	0
Roche noire, dure, litage (shale recuit)	1,0	1	1,0	0	0
Résultats	100		280		36

### 7.1.5 Analyses chimiques des granulats du remblai

Pour chacun des remblais étudiés, un échantillon représentatif a été concassé et broyé afin d'effectuer des analyses chimiques. Les analyses chimiques ont été réalisées par Labo S.M. inc. à Longueuil. Lors de l'analyse chimique, le pourcentage des éléments suivants a été déterminé : l'aluminium (Al), le carbone total (C), le soufre total (S) et les sulfates. Le tableau 7.16 présente les résultats obtenus.

**TABEAU 7.16 ANALYSES CHIMIQUES DES ECHANTILLONS DE REMBLAIS DES GARAGES**

Localisation des résidences	Analyses chimiques			
	Aluminium (Al) mg/kg	Carbone total (C) %	Soufre total (S total) %	Sulfates (SO <sub>4</sub> ) mg/kg
LaPrairie #1	24200	0,90	2,52	7770
LaPrairie #2	17500	1,07	1,76	5300
Boucherville	16200	0,98	2,55	5420

À partir des analyses chimiques, le contenu en pyrite, en calcite, en gypse et en minéraux argileux a été calculé. De plus, le potentiel net de neutralisation de chaque échantillon a été déterminé de la façon suivante :

Potentiel de neutralisation:  $PN = \%C \times 8,33$

Potentiel de génération d'acide:  $PGA = \%FeS_2 \times 31,25$

Potentiel net de neutralisation:  $PNN = PN - PGA$

Si  $PNN > 0$  il y a neutralisation

Si  $PNN < 0$  il s'agit d'un système générateur d'acide

Les résultats se retrouvent au tableau 7.17.

**TABEAU 7.17 CALCUL DE LA QUANTITE DE CERTAINS MINERAUX DANS LES ECHANTILLONS DE REMBLAI**

Localisation des résidences	Equivalent			Minéraux argileux %	PN	PGA	PNN
	Pyrite %	Calcite %	Gypse %				
LaPrairie #1	4,7	7,5	1,4	4,6	7,5	147,3	-139,8
LaPrairie #2	3,3	8,9	0,95	3,3	8,9	102,9	-93,9
Boucherville	4,8	8,2	0,97	3,1	8,2	149,0	-140,9

Les trois échantillons possèdent des potentiels nets de neutralisation négatifs. C'est-à-dire que les trois échantillons génèrent plus d'acide, par l'oxydation des sulfates présents, qu'il n'y a de carbonates disponibles dans la roche pour le neutraliser. Il s'agit donc de trois systèmes générateurs d'acide. La présence de calcite dans la pierre de remblai permet la formation de gypse lorsqu'elle réagit avec l'acide sulfurique produit par l'oxydation de la pyrite.

#### 7.1.6 Examens pétrographiques des granulats en lames minces

Cinq lames minces ont été faites à partir des granulats des échantillons de remblai. Les résultats des examens en microscopie optique des lames minces en lumière transmise et en lumière réfléchie sont présentés sous forme de tableaux. La description des lames minces comprend la composition minéralogique des faciès pétrographiques reconnus ainsi que la nature, l'abondance et/ou texture et la distribution des carbonates, des minéraux argileux, des sulfures de fer et des produits de réaction. Les pourcentages des éléments ont été observés visuellement.

Les tableaux 7.18 et 7.19 présentent la description de deux lames minces provenant de l'échantillon de remblai LaPrairie#1.

**TABLEAU 7.18 LAME MINCE LAPRAIRIE#1-A, MUDSTONE A SILTSTONE**

Éléments	Remarques
A. Fraction terrigène	
A.1 Fraction silteuse	
- Quartz (40%)	
- Plagioclase (5%)	
- Minéraux opaques	
Pyrite framboïdale (1%)	Légère oxydation
Matière organique (1%)	
A.2 Fraction argileuse	
- Minéraux des argiles	Fragments d'argile et/ou argile
B. Fraction orthochimique	
- Dolomite	Forme rhomboédrique

La lame mince LaPrairie#1-B montre une structure en laminations obliques. Les laminations indiquent un transport par traction. On retrouve les minéraux opaques surtout le long des

laminations mais aussi un peu en dehors des laminations. L'argile se retrouve aussi concentrée le long des laminations

**TABLEAU 7.19 LAME MINCE LAPRAIRIE#1-B, SILTSTONE CALCAREUX OU DOLOMITIQUE OU GRES TRES FIN**

Éléments	Remarques
A. Fraction terrigène	
A.1 Fraction silteuse	
- Quartz	
- Feldspath	
- Minéraux opaques	
Pyrite (2%)	Oxydée en bordure
Leucoxène	Minéral titanifère (sphène ou ilménite) altéré
A.2 Fraction argileuse	
- Minéraux des argiles (20%)	Situés le long des laminations
B. Fraction orthochimique	
- Carbonate (12%)	Calcite ou dolomite

Les tableaux 7.20 et 7.21 présentent la description de deux lames minces provenant de l'échantillon de remblai LaPrairie#2. La lame mince LaPrairie#2-A contient des ronds isotropes, avec un cœur de quartz, que l'on peut associer à des radiolaires. Il s'agit de fossiles qui témoignent d'un milieu marin de grande profondeur. Le quartz provient du squelette siliceux. La structure est fissile et laminaire. La pyrite est surtout concentrée le long des laminations.

**TABLEAU 7.20 LAME MINCE LAPRAIRIE#2-A, SHALE**

Éléments	Remarques
A. Fraction terrigène	
A.1 Fraction silteuse	
- Minéraux opaques	
Pyrite framboïdale (2%)	Très fine, pas très oxydée
Matière organique	Associée à la pyrite
A.2 Fraction argileuse	
- Minéraux des argiles	Très bien alignés, constituent la matrice
B. Fraction orthochimique	
- Dolomite	Forme rhomboédrique
C. Fraction allochimique	
- Radiolaire	

La lame mince LaPrairie#2-B présente des plagioclases zonés. Ils indiquent que la solution n'était pas en équilibre lors de la cristallisation

**TABLEAU 7.21 LAME MINCE LAPRAIRIE#2-B, DIORITE**

<b>Éléments</b>	<b>Remarques</b>
Plagioclase	Calcique, fort relief, zoné
Amphibole titanifère	Altération en chlorite, calcite et épidote
Muscovite	
Clinopyroxène	Très altéré, forme cristalline conservée
Pyrite (1%)	Cubique et framboïdale en début d'oxydation
Hématite (2%)	
Apatite (trace)	

Le tableau 7.22 présente la description d'une lame mince provenant de l'échantillon de remblai Boucherville. Absence de minéraux opaques. Texture trachytique.

**TABLEAU 7.22 LAME MINCE BOUCHERVILLE, SYENITE**

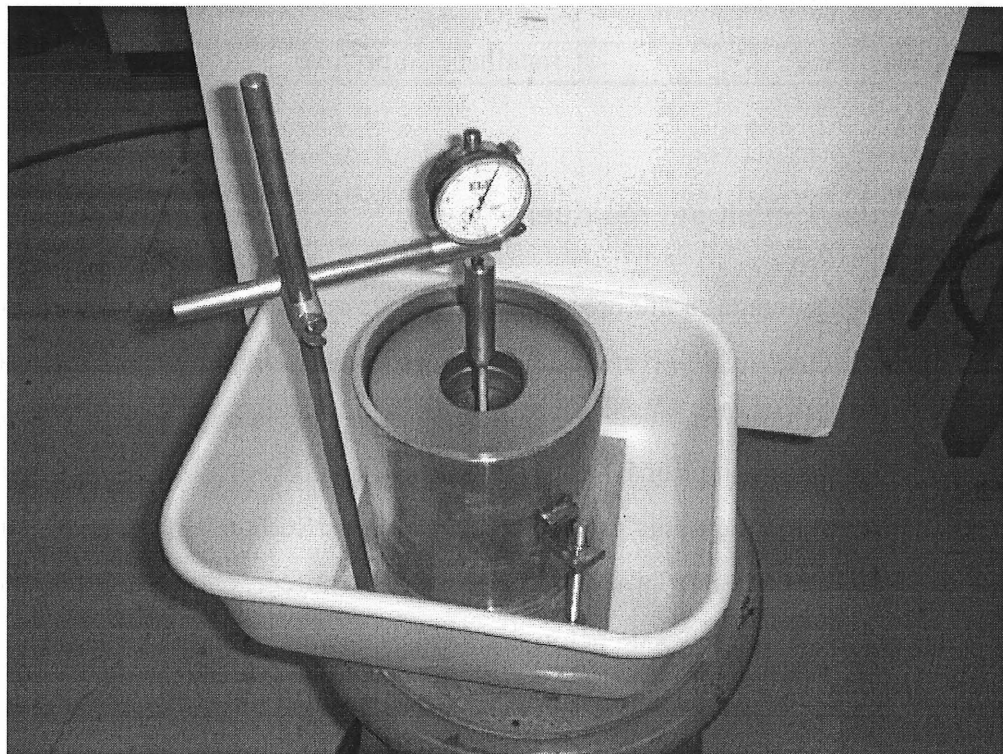
<b>Éléments</b>	<b>Remarques</b>
Plagioclase (albite ?)	Altéré
Feldspath potassique	Amorphe, cristallisé en dernier
Néphéline	Parfois altérée
Amphibole alcaline	Cristallisée en premier

## **7.2 Essai de gonflement résiduel**

Un montage expérimental a été créé par le Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée (LRMGA) de l'Université de Sherbrooke pour simuler le gonflement de granulats en conditions réelles. En effet, aucun essai normalisé n'existe à ce jour pour mesurer le gonflement de granulats dans ces conditions. L'essai de gonflement est effectué sur les trois échantillons de remblai provenant de bâtiments résidentiels sur la Rive-Sud de Montréal. Il s'agit d'un essai de gonflement résiduel puisque la réaction a déjà été amorcée dans les granulats lorsque ceux-ci étaient en place sous les dalles de béton des garages et servaient comme remblai.

### 7.2.1 Montage expérimental

Le montage utilisé (voir figure 7.4) est semblable à celui utilisé pour l'essai CBR (California Bearing Ratio). Il s'agit du même montage développé dans le cadre de la maîtrise de Gilbert Nkurunziza (Université de Sherbrooke). L'échantillon est premièrement réduit en suivant la norme BNQ 2560-015. Seul le passant 20 mm est conservé. L'échantillon est ensuite humidifié pour obtenir la densité optimum (norme BNQ 2501-255-M-86). L'échantillon est compacté dans un moule CBR de 152,4 mm de diamètre en suivant la procédure C de la norme ASTM D1557-91. Il est ensuite placé dans un contenant en plastique rempli de deux litres d'eau distillée. Une solution de culture bactérienne (*Thiobacillus Thioparus*) est ajoutée à l'eau pour accélérer le gonflement. Une plaque perforée est installée à la base du moule pour permettre la diffusion par capillarité de la phase liquide à travers le solide. Au-dessus de l'échantillon, une charge de 4,5 kg (10 livres) est appliquée. La mesure du gonflement est effectuée à l'aide d'un comparateur visuel. La prise de mesure se fait manuellement. Les trois montages sont entreposés dans une chambre à humidité (100%) et température (38°) contrôlées. Le tableau 7.23 donne les paramètres de chaque montage.



**Figure 7.7 Montage expérimental de gonflement en laboratoire**

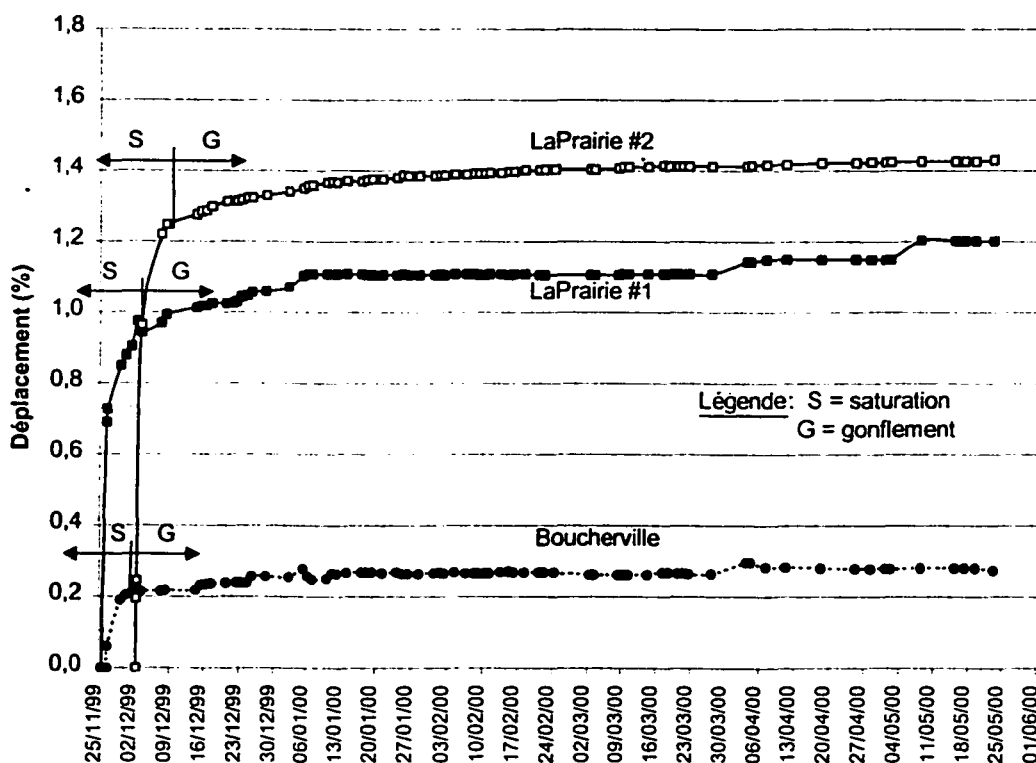


**TABEAU 7.23 PARAMETRES DES MONTAGES**

Paramètres	Localisation des résidences		
	LaPrairie#1	LaPrairie#2	Boucherville
Matériau du moule CBR	Plastique	Acier inoxydable	Plastique
Masse sèche de l'échantillon (g)	4789,0	5470,5	4718,5
Eau ajoutée (% de la masse sèche)	5,5	5,5	5,5
Masse humide de l'échantillon (g)	5052,4	4978,0	5771,4
Volume compacté (cm3)	21,22	21,24	21,23
Densité humide (g/cm3)	2,38	2,34	2,72

### 7.2.2 Mesure du gonflements résiduels

Les trois essais de gonflement ont débuté aux alentours du 1<sup>er</sup> décembre 1999. Les mesures du gonflement ont été prises manuellement, plusieurs fois par semaine. Les résultats sont présentés en % à la figure 7.5. Les résultats vont jusqu'à la fin mai 2000. Ainsi, une période de six mois de gonflement est représentée sur le graphique pour les trois remblais étudiés. Il est à noter que les essais sont toujours en cours.



**Figure 7.8 Essai de gonflement résiduel en chambre humide (lecture visuelle)**

À la figure 7.5, on peut remarquer que les courbes de LaPrairie#1 et Boucherville possèdent un plateau. Le remblai de LaPrairie#1 a cessé de gonfler le 6 janvier 2000 tandis que le remblai de Boucherville a cessé de gonfler le 14 janvier 2000. Il est difficile de croire que le gonflement de ces deux remblais aurait arrêté parce que toute la pyrite présente aurait été oxydée et que la réaction de gonflement soit terminée. Il s'agit plutôt d'une saturation excessive des échantillons. Une trop grande quantité d'eau se trouvait dans les contenants en plastique, ce qui aurait saturé les échantillons. L'apport en oxygène dans le moule était grandement réduit et empêchait l'oxydation de la pyrite de se produire. Le niveau d'eau dans les contenants en plastique a été ajusté pour que seule la base des moules trempe dans l'eau. Ceci a permis au remblai de LaPrairie #1 de reprendre le gonflement le 3 avril 2000. Pour ce qui est du remblai de Boucherville, le gonflement s'est mis à osciller sans se stabiliser.

Si l'on considère seulement la période de gonflement, il est possible d'établir un taux de gonflement mensuel des remblais. Le tableau 7.24 présente les résultats.

**TABEAU 7.24 TAUX DE GONFLEMENT DES REMBLAIS EN CHAMBRE HUMIDE**

Echantillon de remblai	Début du Gonflement	Fin de la mesure du gonflement	Nombre de jours	Déplacement (%)	Taux de gonflement mensuel (30 jours)
LaPrairie#1	02/12/99	06/01/00	35	0,132	0,067%
	03/04/00	23/05/00	50	0,059	
LaPrairie#2	08/12/99	23/5/00	167	0,183	0,033%
Boucherville	01/12/99	14/01/00	45	0,059	0,039%

Il est possible de calculer le gonflement annuel des remblais. On suppose que les trois remblais ont 1,2 m d'épaisseur.

- LaPrairie#1 :  $1,2 \text{ m} * 0,067 \% * 12 \text{ mois} = 9,7 \text{ mm/an}$  ;
- LaPrairie#2 :  $1,2 \text{ m} * 0,033 \% * 12 \text{ mois} = 4,7 \text{ mm/an}$  ;
- Boucherville :  $1,2 \text{ m} * 0,039 \% * 12 \text{ mois} = 5,7 \text{ mm/an}$ .

Pour les trois Fissuro-Logger installés, un seul mesurait le soulèvement de la dalle de béton. Il était installé dans le garage de LaPrairie#1. En sept mois, ou 213 jours, un soulèvement de 7,2 mm a été enregistré. Supposons que le remblai ait 1,2 m d'épaisseur. En 30 jours, le remblai devrait gonfler de  $1,2 \text{ m} * 0,067 \% = 0,8089 \text{ mm}$ . Si on ramène ce gonflement à 213 jours, on

obtient  $0,8089 \text{ mm} * 213 \text{ jrs} / 30 \text{ jrs} = 5,7 \text{ mm}$  de gonflement. Ainsi, pour le remblai LaPrairie#1, on a mesuré un soulèvement de 7,2 mm sur le terrain et, pour la même période de temps, on a calculé un gonflement de 5,7 mm d'après le taux de gonflement mesuré en laboratoire. Ces deux résultats concordent puisque le soulèvement mesuré à l'aide du fissuromètre est combiné à un basculement de la dalle de béton et est donc accentué. Ainsi, l'essai de gonflement en laboratoire manifeste une certaine corrélation avec ce qui se déroule sur le terrain.

### **7.3 Synthèse des trois cas**

Une synthèse des résultats obtenus lors de la caractérisation du potentiel de gonflement des matériaux granulaire est présentée pour les trois remblais échantillonnés.

#### **7.3.1 Synthèse des résultats de caractérisation de LaPrairie#1**

Lors du relevé visuel du garage âgé de quatre ans, quelques fissures en étoile et longitudinales, des soulèvements et la présence de poudre blanchâtre ont pu être notés. Les murs de fondation sont intacts. La carotte de béton a 90 mm d'épaisseur et est peinte. Elle ne présente aucune sulfatation et ne repose pas sur un polythène. L'essai sonique indique que la qualité du béton est bonne. L'analyse granulométrique de l'échantillon de remblai recueilli a permis de déterminer qu'il s'agit d'une pierre graduée 14-0 mm. L'échantillon s'avère être composé à 100% de shale. À la surface de la pierre, plusieurs plaques d'oxydation et des cristaux de gypse étaient observables. L'analyse pétrographique a permis de calculer un IPPG de 100 et un nombre pétrographique de 600. L'analyse chimique a permis de déterminer le contenu de certains minéraux de la pierre : 4,7% de pyrite, 7,5% de calcite et 4,6% de minéraux argileux. L'examen de lames minces a révélé la présence de plus de 1% de pyrite framboïdale dans la pierre.

La mesure du gonflement résiduel en chambre humide a permis de déterminer un taux de gonflement mensuel (30 jours) de 0,067%. Ceci donnerait un gonflement annuel de 9,7 mm si le remblai était de 1,2 mètres.

Le matériau granulaire échantillonné représente un potentiel de gonflement élevé. Les dommages observés dans le garage montrent que la réaction a déjà débuté. L'analyse chimique, l'examen de lames minces et l'essai de gonflement résiduel en laboratoire démontrent que la réaction peut encore se poursuivre. Aucun problème de sulfatation n'a été noté. Les poussées verticales sur la dalle de béton devraient se poursuivre. Des poussées latérales sur les murs de fondation pourraient se produire.

### 7.3.2 Synthèse des résultats de caractérisation de LaPrairie#2

Lors du relevé visuel du garage âgé de six ans, plusieurs fissures en étoile, des soulèvements et un peu de poudre blanchâtre ont pu être notés. Les murs de fondation sont intacts. La carotte de béton a 110 mm d'épaisseur et est peinte. Elle présente un léger début de sulfatation et ne repose pas sur un polythène. L'essai sonique indique que la qualité du béton est bonne. L'analyse granulométrique de l'échantillon de remblai recueilli a permis de déterminer qu'il s'agit d'une pierre graduée 28-0 mm. L'échantillon s'avère être composé à 95,6 % de shale, à 3,1% de roche intrusive et à 1,3 % de calcaire. À la surface de la pierre, plusieurs plaques d'oxydation et des cristaux de gypse étaient observables. L'analyse pétrographique a permis de calculer un IPPG de 94 et un nombre pétrographique de 581. L'analyse chimique a permis de déterminer le contenu de certains minéraux de la pierre : 3,3% de pyrite, 8,9% de calcite et 3,3% de minéraux argileux. L'examen d'une lame mince de shale a révélé la présence de 2% de pyrite framboïdale dans la pierre.

La mesure du gonflement résiduel en chambre humide a permis de déterminer un taux de gonflement mensuel (30 jours) de 0,033%. Ceci donnerait un gonflement annuel de 4,7 mm si le remblai était de 1,2 mètres.

Le matériau granulaire échantillonné représente un potentiel de gonflement élevé. Les dommages observés dans le garage montrent que la réaction a débuté. L'analyse chimique, l'examen de lames minces et l'essai de gonflement résiduel en laboratoire démontrent que la réaction peut encore se poursuivre. Un début de sulfatation a été noté. Cependant, la composition de la pierre échantillonnée laisse présager que la sulfatation devrait rester faible.

Les poussées verticales sur la dalle de béton devraient se poursuivre. Des poussées latérales sur les murs de fondation pourraient se produire.

### **7.3.3 Synthèse des résultats de caractérisation de Boucherville**

Lors du relevé visuel du garage âgé de sept ans, 1 ou 2 fissures longitudinales ou en étoile, des soulèvements importants (20 mm) et la présence de poudre blanchâtre ont pu être notés. Les murs de fondation sont fissurés à trois endroits. Ils présentent aussi des déplacements importants. La carotte de béton a en moyenne 75 mm d'épaisseur et n'est pas peinte. Elle ne présente aucune sulfatation et ne repose pas sur un polythène. L'essai sonique indique que la qualité du béton est bonne. L'analyse granulométrique de l'échantillon de remblai recueilli a permis de déterminer qu'il s'agit d'une pierre graduée 28-0 mm. L'échantillon s'avère être composé à 53,9% de syénite, à 38,2 % de shale et à 7,8 % d'une roche compétente formant la zone de contact. À la surface du shale, plusieurs plaques d'oxydation et des cristaux de gypse étaient observables. L'analyse pétrographique a permis de calculer un IPPG de 36 et un nombre pétrographique de 280. L'analyse chimique a permis de déterminer le contenu de certains minéraux de la pierre : 4,8% de pyrite, 8,2% de calcite et 3,1% de minéraux argileux.

La mesure du gonflement résiduel en chambre humide a permis de déterminer un taux de gonflement mensuel (30 jours) de 0,039%. Ceci donnerait un gonflement annuel de 5,7 mm si le remblai était de 1,2 mètres.

Le matériau granulaire échantillonné représente un potentiel de gonflement élevé. Les dommages observés dans le garage montrent que la réaction a débuté. L'analyse chimique et l'essai de gonflement résiduel en laboratoire démontrent que la réaction peut encore se poursuivre. Aucun problème de sulfatation n'a été noté. Les poussées verticales sur la dalle de béton et les poussées latérales sur les murs de fondation devraient se poursuivre.

### **7.3.4 Discussion**

L'exécution des essais a permis de faire ressortir certains points. Premièrement, le gonflement du remblai et la sulfatation de la dalle de béton sont deux phénomènes qu'il est possible de retrouver combinés comme le démontre le cas de LaPrairie#2. L'analyse pétrographique du remblai permet de calculer l'IPPG. Cet indice donne une appréciation sur le gonflement du remblai et non sur la sulfatation du béton. Il est donc important de bien établir la cause du soulèvement de la dalle de béton.

Deuxièmement, l'analyse chimique permet de déterminer le contenu en pyrite de la roche. Cependant, la majorité des roches en contiennent. Pour bien évaluer le potentiel de gonflement d'un remblai, il ne faut pas seulement connaître la quantité de pyrite présente dans la pierre mais aussi connaître les propriétés mécaniques de la pierre. En effet, le gonflement d'une roche implique la présence de pyrite et de faibles qualités mécaniques. Le shale possède de faibles propriétés mécaniques. Son mode de formation en litages lui confère une faible résistance entre les lits. Ainsi, lors de la formation de cristaux de gypse entre les lits, le shale se transforme facilement en «mille-feuilles». De plus, le shale est composé de minéraux argileux qui facilitent l'absorption d'eau et son accessibilité à la pyrite qui se situe à l'intérieur du shale. Ainsi, même la pyrite se trouvant à l'intérieur d'un granulats de shale peut s'oxyder et provoquer un gonflement de la roche.

Troisièmement, la granulométrie des remblais dans les garages est très étalée. La surface spécifique de la pierre étalée est plus élevée que la surface spécifique d'une pierre nette de calibre 20 mm. Ceci implique qu'il y a plus de pyrite exposée à la surface qui peut s'oxyder plus facilement. Aussi, une granulométrie étalée permet la montée des sulfates jusqu'à la dalle par capillarité plus aisément que dans le cas d'une pierre nette. De plus, on retrouve un passant 5 mm souvent très élevé (plus du tiers de la pierre dans les 3 cas étudiés). Les petites fractions, 5-0 mm, impliquent les moins bons fragments du point de vue propriétés mécaniques puisqu'ils ont pu être concassés jusqu'à une petite taille.

## CONCLUSIONS

Cette étude porte sur les problèmes reliés au gonflement de remblais pyriteux et comporte trois volets de recherche. Pour chacun des volets, des objectifs précis avaient été définis et ont été rencontrés. Voici les principales conclusions qui sont ressorties de chacun des volets de l'étude :

### 1<sup>er</sup> volet : Campagne d'investigation

La campagne d'investigation de cas résidentiels s'est déroulée dans les municipalités de Longueuil, Boucherville et Saint-Bruno-de-Montarville. Un total de 224 bâtiments résidentiels a été inspecté. L'inventaire comprend 224 relevés visuels au sous-sol et 197 relevés visuels au garage. Plusieurs points sont ressortis de cette étude de résidences. En voici les principaux :

- L'âge des maisons affectées par le problème de remblai gonflant peut aller de 6 à 57 ans ;
- Les dommages sont souvent plus importants dans les garages que dans les sous-sols ;
- La classification des observations recueillies selon cinq niveaux de confiance des observations permet d'affirmer que 154 garages sur 197 et que 73 sous-sols sur 224 sont affectés ou sont très probablement affectés par un problème de remblai gonflant ;
- Les principaux symptômes révélateurs ont été identifiés (Ils sont présentés et discutés à la section 5.5 *Discussion*).
- Les dommages reliés au gonflement d'un remblai pyriteux peuvent aussi être accompagnés par d'autres dommages associés à des problèmes de dimensionnement ou d'ordre géotechnique (mauvais compactage, tassements différentiels, sécheresse...). Il est très important, lors d'un relevé visuel des dommages, de bien déterminer la cause réelle des désordres observés.

### 2<sup>e</sup> volet : Projet d'instrumentation

Le projet d'instrumentation a été réalisé dans cinq garages de bâtiments résidentiels. Des fissures dans les dalles de béton et dans les murs de fondation entourant le garage ont été instrumentées à l'aide de fissuromètres mécaniques visuels de type Tell-Tale et de fissuromètres à acquisition automatique de données de type Fissuro-Logger. Les points suivants sont ressortis de ce projet :

- Les fissuromètres de type Tell-Tale permettent de déterminer à long terme s'il existe des mouvements ou non provenant de la structure étudiée ;
- Les fissuromètres de type Tell-Tale a une précision trop faible (0,5 mm) pour déterminer quantitativement l'ampleur des mouvements perçus ;
- Les fissuromètres de type Fissuro-Logger permettent de déterminer à moyen terme (quelques mois) s'il existe des mouvements ou non provenant de la structure étudiée ;
- Les fissuromètres de type Fissuro-Logger sont de grande précision (0,01 mm) et permettent de calculer le taux de la progression des mouvements enregistrés ;
- Grâce à l'instrumentation installée, il est possible d'affirmer que le phénomène de gonflement du remblai est toujours en cours dans les cinq garages étudiés puisque des déplacements y ont été enregistrés;
- Grâce aux trois Fissuro-Logger, il est possible de qualifier la vitesse de gonflement du remblai de trois garages comme étant faible, modérée ou rapide.

### 3<sup>e</sup> volet : Essai de gonflement résiduel accéléré

Parmi les cinq garages instrumentés, trois remblais de garage ont été échantillonnés. La caractérisation granulométrique, pétrographique et chimique des matériaux granulaires a été faite. Les échantillons ont aussi été soumis à un essai de gonflement résiduel accéléré. Voici les principaux points qui sont ressortis de ces essais :

- Le gonflement du remblai et la sulfatation apparente de la dalle de béton sont deux phénomènes qui peuvent se produire simultanément (cas de LaPrairie #2) ;
- Les différentes étapes de caractérisation des matériaux granulaires permettent de déterminer qualitativement le potentiel de gonflement résiduel des remblais en déterminant le type de roche et en évaluant la quantité de pyrite non oxydée ;
- Les résultats obtenus à partir des essais de gonflement résiduel en chambre humide permettent d'estimer le gonflement résiduel;
- Il existe une corrélation positive entre les niveaux de gonflement en laboratoire et ceux mesurés sur le terrain à l'aide de fissuromètre dans le cas de LaPrairie #1;



La compilation des données provenant des relevés des dommages de bâtiments résidentiels causés par la présence de remblais pyriteux est une première. Aucune autre compilation du genre n'a été faite jusqu'à aujourd'hui. L'investigation des maisons a permis de sélectionner quelques maisons pour une étude plus approfondie. Cette étude consistait en l'instrumentation des dommages, la caractérisation des granulats ainsi qu'en l'essai de gonflement résiduel. Chacun des trois volets prédéfinis de l'étude servait à répondre aux objectifs visés. Les différentes étapes du déroulement du projet sont reliées entre elles et se complètent les unes aux autres. C'est la réalisation de l'investigation qui a permis de choisir des maisons types pour la réalisation des deux autres volets de l'étude. L'instrumentation, la caractérisation des granulats et l'essai de gonflement résiduel permettent de mieux cerner la cause du problème, de déterminer l'évolution des dommages dans le temps et de prédire les gonflements à venir. Cette séquence d'étude type rend ce projet tout à fait unique.

Le travail effectué par François Côté en 1990 [CÔTÉ 1990] portait premièrement sur l'étude de certains cas de gonflement causés par l'altération des shales pyriteux. Sur les dix cas qu'il a étudié, un seul cas était un bâtiment résidentiel comparativement à 224 cas résidentiels dans la présente étude. Côté a par la suite établi des corrélations entre les différents cas types qu'il a étudié et a présenter un résumé des dommages les plus fréquents. Dans la présente étude, l'auteure a poursuivi les travaux entrepris en déterminant les symptômes les plus révélateurs de la présence de remblais pyriteux gonflants dans les sous-sols et dans les garages de bâtiments résidentiels.

Dans la deuxième partie de son étude, Côté a simulé le phénomène de gonflement du shale noir pyriteux en laboratoire et a mesuré la force d'expansion. Il a utilisé du shale noir pyriteux concassé, ne provenant pas d'un matériau de fondation, dans lequel aucune réaction d'oxydation et de cristallisation n'avait débutée avant le commencement de l'essai. Dans la présente étude, le matériau utilisé dans les essais en laboratoire provenait de remblais sous dalle de béton de garage, lesquelles présentaient des dommages associés à la présence de shale pyriteux. Ainsi, les réactions d'oxydation et de cristallisation avaient déjà débutées dans les matériaux avant le commencement des essais en laboratoire. L'expansion mesurée était donc l'expansion résiduelle du matériau.



## RECOMMANDATIONS

La campagne d'investigation de l'été 1999 a été réalisée selon les connaissances scientifiques du moment. Elle était la première du genre et se limitait à trois municipalités et à seulement 224 cas et ne durait que quelques mois. La compilation des données a permis de connaître les points importants à observer lors d'un relevé visuel. Elle a aussi permis de trouver quelques points manquants au formulaire. Une nouvelle campagne d'investigation de bâtiments résidentiels affectés par les problèmes de gonflement de remblais pyriteux est donc fortement suggérée. Elle devrait être réalisée dans d'autres municipalités de la Rive-Sud de Montréal. En effet, il est difficile d'extrapoler les résultats obtenus à l'extérieur des trois municipalités étudiées soit Longueuil, Boucherville et Saint-Bruno-de-Montarville. Pour avoir une plus grande vue d'ensemble du problème sur la Rive-Sud de Montréal, il serait préférable de réaliser les relevés visuels dans les résidences d'autres municipalités. Un nouvel inventaire de maisons serait utile et souhaitable pour avoir un aperçu général de la situation dans des municipalités voisines de celles déjà étudiées. Un plus grand échantillonnage de maisons permettrait de venir appuyer et/ou compléter la compilation déjà réalisée. Une nouvelle version du formulaire utilisé lors des relevés visuels est présentée à l'annexe 2. Le formulaire contient de nombreux ajouts et plusieurs points ont été détaillés. Ainsi, si la campagne est exécutée par plusieurs observateurs, les variations pouvant survenir d'un relevé à l'autre seront diminuées. Une étude géostatistique des données recueillies peut aussi être profitable.

Le volet d'instrumentation en cours dans cinq garages devrait être continué durant 1 à 2 ans. Ainsi, les structures auront été instrumentées sur une longue période. Il sera alors intéressant de voir le déplacement total après un an ou plus et à la suite du passage de quatre saisons et de pouvoir analyser les taux de progression dans le temps. Une nouvelle campagne d'instrumentation est aussi suggérée. Cette fois, des sous-sols pourraient être instrumentés. Lors de l'installation des instruments, il est conseillé de fixer le point de référence sur un plan neutre, qui ne subit pas de mouvement et qui possède un coefficient de dilatation thermique très faible. La pose de thermocouples à la surface et à la base des remblais instrumentés est recommandée pour connaître le gradient thermique réel. L'utilisation de fissuromètres à acquisition de données automatique, versus les fissuromètres visuels, est fortement suggérée.

Les remblais instrumentés devraient aussi être échantillonnés. L'échantillonnage devrait être fait sur toute l'épaisseur du remblai pour voir si celui-ci est homogène. Une partie du sol naturel pourrait aussi être échantillonnée et analysée. La composition du sol peut être responsable d'autres problèmes. Par exemple, un sol argileux voit son volume diminuer significativement lors d'une période de sécheresse. Ceci peut engendrer des tassements différentiels et provoquer la fissuration du béton.

Lors de la réalisation de nouveaux essais de gonflement résiduel, il serait intéressant d'étudier l'action de la syénite comme catalyseur dans la formation de sulfates. En effet, quelques cas ont présenté des dommages plus importants lorsque le remblai était composé en plus grande partie de syénite que de shale pyriteux. Lors des essais de gonflement, on pourrait vérifier l'influence de du degré de saturation sur la vitesse de gonflement des échantillons dans les moules CBR.

Une étude portant sur l'échantillonnage de l'eau se trouvant dans la nappe phréatique permettrait de déterminer le potentiel générateur de sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de l'eau souterraine et les facteurs qui y agissent.

## RÉFÉRENCES

- ACKER, P. (juillet-août 1988) *Retraits et fissurations des bétons* Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, no 466, série : béton 255, p. 22-40.
- AEG – SECTION DE MONTRÉAL (1997) *Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement*, Comptes-rendus Colloque AEG-1997 en collaboration avec le RPPG, Laval, Québec, env. 350 p.
- AEG – SECTION DE MONTRÉAL (1998) *Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement – Le point sur la situation au Québec*, Comptes-rendus Colloque AEG-1998, Montréal, Québec, env. 300 p.
- BALLIVY, G., BELLALLOUI, A. (mai 1997) *Mise en évidence de divers mécanismes de gonflement et mise en garde pour la conception des fondations*, Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 11 p.
- BALLIVY, G., BELLALLOUI, A. (décembre 1999) *New Swelling Test to Characterize the Expansive Potential of Pyritic Rockfill*, Geotechnical News, p. 53-55.
- BELLALLOUI, A., BALLIVY, G. (décembre 1999) *Problèmes de gonflement de remblais de fondation associés à la pyrite*, Chimiste, p. 20-23.
- BÉRARD, J. (1970) *Black Shale Heaving at Ottawa, Canada : Discussion*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 7, p. 113-114.
- BÉRARD, J. (mai 1997) *Des désordres sulfatiques*, Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 11 p.
- BÉRARD, J., ROUX, R., DURAND, M. (1975) *Performance of Concrete Containing a Variety of Black Shale*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 2, p. 58-65.
- BERTRAND, J., BALLIVY, G. (1991) *Excavations rocheuses : Évaluation du potentiel à générer des eaux de ruissellement acides par l'oxydation des sulfures*, Première conférence canadienne de géotechnique environnementale, Montréal, p. 437-443.

- BÉRUBÉ, M.A., LOCAT, J., GÉLINAS, P., CHAGNON, J.Y., LEFRANÇOIS, P. (1986) *Black Shale Heaving at Sainte-Foy, Quebec, Canada*, Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 23, p. 1774-1781.
- BÉRUBÉ, M.A. (mai 1997) *Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement : La situation actuelle au Québec* Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 40 p.
- BLANCHETTE, A. (décembre 1997) *Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Comptes-rendus - Colloque RPPG*, Évolution dans l'industrie du granulat, Sainte-Foy, Québec, 12 p.
- BLATT, H. ET AL. (1980) *Origin of Sedimentary Rocks*, Prentice-Hall, Toronto, Ontario, 782 p.
- CLARK, C.S. (1966) *Oxidation of Coal Mine Pyrite*, Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings Paper 4802 of the American Society of Civil Engineering, vol. 92, no. SA2, p. 127-145.
- Code national du bâtiment – Canada 1995*, Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendie, CNRC 38763F, 602p.
- COMITÉ TECHNIQUE QUÉBÉCOIS D'ÉTUDE DES PROBLÈMES DE GONFLEMENT ASSOCIÉS À LA PYRITE (juillet 1999) *Protocole d'expertise sur bâtiments existants*, document CTQ-M200, version 1.0, 32 p.
- CÔTÉ, F. (1990) *Expansion de shales pyriteux* Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal, 177 p.
- DIVET L. (janvier-février 1996) *Activité sulfatique dans les bétons consécutive à l'oxydation des pyrites contenues dans les granulats*, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, p. 45-63;
- FASISKA, E.J., WAGENBLAST, T.N., DOUGHERTY, M.T. (1974) *The Oxidation Mechanism of Sulphide Minerals*, Association of Engineering Geologists, Bulletin, vol. 11, no. 1, p. 482-489.

- GRATTAN-BELLEW, P.E., McROSTIE, G.C. (1982) *Evaluation of Heave Prevention Methods for Floors founded on Shale in the Ottawa Region*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 19, p. 108-111.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D., traduit par LAFLEUR, J. (1991) *Introduction à la géotechnique*, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 808p.
- LUTENEGGER, A.J., WOLLENHAUPT, N.C., HANDY, R.L. (1979) *Laboratory simulation of Shale Expansion by Induced Gypsum Growth*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 16, p. 405-409.
- MORGENSTERN, N.R. (1970) *Black Shale Heaving at Ottawa : Discussion*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 7, p. 114-115.
- PENNER, E., EDEN W.J., GRATTAN-BELLEW P.E. (mai 1975) *Expansion of Pyritic Shales*, Canadian Building Digest, CBD-152, 5 p.
- PERRIER, Y., TANGUAY, C. (octobre 1999) *La pyrite et votre maison – Mieux comprendre le phénomène du gonflement des remblais sous dalle*, Association des consommateurs pour la qualité dans la construction, Montréal, 48 p.
- QUIGLEY, R.M., VOGAN, R.W. (1970) *Black Shale Heaving at Ottawa, Canada*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 7, p. 106-112.
- QUIGLEY, R.M., ZAJIC, J.E., McKYES, E., YOUNG, R.N. (1973a) *Oxydation and Heave of Black Shale*, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineering, vol. 99, no. SM5, p. 417-420.
- QUIGLEY, R.M., ZAJIC, J.E., McKYES, E., YOUNG, R.N. (1973b) *Biochemical Alteration and Heave of Black Shale – Detailed Observations and Interpolations*, Canadian Journal of Earth Science, vol. 10, p. 1005-1015.
- SINGER, P.C., STUMM, W. (1970) *Acidic Mine Drainage : the Rate-Determination Step*, Science, vol. 167, p. 1121-1123.
- SIWICK, R. (1986) *Hydrogeochemical investigation of Reactive Tailings at Waite Amulet Tailings Site*, Noranda, Québec 1985, Noranda Research Center, 208 p.

- SIWICK, R., PRAIRIE, R., PAYANT, S. (1987) *Hydrogeochemical Investigation of Reactive Tailings at Waite Amulet Tailings Site, Noranda, Québec, Phase 2 1986*, Noranda Research Center, 270 p.
- TANGUAY, M. G. (1998) *Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, le point sur la situation au Québec Colloque AEG-RPPG*, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 12 p.



## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- AL-HOMOUD, A.S., BASMA, A.A., HUSEIN MALKAWI, A.I., AL BASHABSHEH, M.A., (juillet 1995) *Cyclic Swelling Behavior of Clays*, Journal of Geotechnical Engineering, p. 562-565.
- AL-HOMOUD, A.S., KHEDAYWI, T., AL-AJLOUNI, A.M. (janvier 1999) *Effectiveness and Economic Feasibility of Bitumen, Lime and Cement in Reducing Swell Potential of a Clayey Soil* Environmental & Engineering Geoscience, 18 p.
- BASMA, A.A., AL-HOMOUD, A.S., HUSEIN, A. (1995) *Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils* Applied Clay Science, no 9, p. 355-368.
- BRUNE, G. (1965) *Anhydrite and Gypsum Problems in Engineering Geology*, Engineering Geology, vol. 2, p. 26-38.
- CAMBEFORT, H. (1964) *Injection des sols. Tome I : Principes et méthodes* Édition Eyronnes, Paris, 393 p.
- CASANOVA, I., AGULLO, L., AGUADO, A. (1996) *Aggregate Expansivity Due to Sulfide Oxidation – I. Reaction System and Rate Model*, Cement and Concrete Research, vol. 26, no. 7, p. 993-998.
- CHERTKOV, V.Y., RAVINA, I. (septembre-octobre 1998) *Modeling the Crack Network of Swelling Clay Soils*, Soil Science Society American Journal, vol. 62, p. 1162-1171.
- CÔTÉ, F. (mai 1997) *Mécanisme de gonflement et simulation en laboratoire* Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 18 p.
- CÔTÉ, F., BÉRARD, J., ROUX, R. (1991) *Cas de réactivité et de gonflement de remblais granulaires riches en shale pyriteux*, Collection Environnement et Géologie, vol. 12, APPG, p. 225-247.
- CÔTÉ, F., MÉNARD, D. (mai 1997) *Histoire de cas, expertise et réfection d'une structure* Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 40 p.

- DAY, R.W. (printemps 1998) *Study of Differential and Lateral Movement of Buildings* Environmental and Engineering Geoscience, vol. IV, no. 1, p. 117-123.
- GLOBENSKY, Y. (1985) *Géologie des régions de Saint-Jean (partie nord) et de Beloeil* MM 84-03, Gouvernement du Québec, Ministère de l'énergie et des ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale, 91p.
- GRATTAN-BELLEW, P.E., EDEN, W.J. (1975) *Concrete Deterioration and Floor Heave Due to Biogeochemical Weathering of Underlying Shale*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 12, p. 372-378.
- HAWKINS, A.B., PINCHES, G.M. (1992) *Ground Chemistry Implications for Construction*, Proceedings of the International Conference on the Implications of Ground Chemistry and Microbiology for Construction, University of Bristol, UK, Session 2, p. 51-76.
- LACROIX, P., CÔTÉ, F. (août 1991) *Soulèvement de dalles sur shale pyriteux et sulfatation des bétons historique de cas au Québec (Canada)*, Second Canmet/ACI International Conference on Durabilité of Concrete, Montréal, 25 p.
- LINDER, E. (1976) *Swelling Rock : a Review*, Rock Engineering, p. 141-181.
- LO, K.Y., LEE, Y.N. (1990) *Time-Dependent Deformation Behaviour of Queenston Shale*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 27, p. 461-471.
- LONGWORTH, I. (avril 1999) *Responding to thaumasite form of sulfate attack* Ground Engineering, vol. 32, no. 4, p. 24-25;
- LOPEZ-LARA, T., ZEPEDA-GARRIDO, J.A., CASTARIO, V.M. *A Comparative Study of the Effectiveness of Different Additives on the Expansion Behavior of Clays*, <http://geotech.civen.okstate.edu/ejge/Ppr9904/lopez9904.htm>, 8 p.
- MCCLELLAN, G.H., EADES, J.L., JOHNSON, N.A. (1998) *Simple Field Method to Detect Sulfide Sulfur in Rocks*, Environmental and Engineering Geoscience, Technical Notes, AEG, vol. IV, no. 1, Spring, p. 115-116;
- MOUM, J., ROSENQVIST, I.T. (septembre 1959) *Sulfate Attack on Concrete in the Oslo Region*, Journal of the American Concrete Institute, Proceeding, vol. 56, p. 257-264.

- MUSTIN, C., MARION, P., BERTHELINS, J., DONATO, P., MONROY, M. (1991) *Une technique originale pour suivre l'oxydation bactérienne d'une pyrite : les électrodes en sachets*, C.R. Acad. Sci., Paris, tome 312, série II, p. 1197-1203.
- NICHOLSON, R.V., GILLHAM, R.W., CHERRY, J.A., REARDON, E.J. (1989) *Reduction of Acid Generation in Mine Tailings Through the Use of Moisture-Retaining Cover Layers as Oxygen Barriers*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 26, p. 1-8.
- NIELSON, K.K., ROGERS, V.C., GEE, G.W. (1984) *Diffusion of Radon Through Soils : a Pore Distribution Model*, Soil Science Society of America Journal, vol. 48, p. 482-487.
- NORDSTROM, D.K. (1982) *Aqueous Pyrite Oxydation and Consequent Formation of Secondary Iron Minerals in Acidic Sulphate Weathering*, Soil Science Society of America Journal, Special Publication, vol. 10, p. 37-56.
- PENNER, E., EDEN, W.J., GILLOT, J.E. (1970) *Investigation of Heave in Billings Shale by Mineralogical and Biogeochemical Methods*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 7, p. 333-338.
- PENNER, E., EDEN, W.J., GILLOT, J.E. (1973) *Floor Heave Due to Biochemical Weathering of Shale*, Proceedings, 8<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Moscow, vol. 2, Part 2, Session 4, p. 151-158.
- PUGH, C.E., HOSSNER, L.R., DIXON, J.B. (1984) *Oxidation Rate of Iron Sulfides as Affected by Surface Area, Morphology, Oxygen Concentration and Autotrophic Bacteria*, Soil Science, vol. 137, no. 5, p. 309-314.
- ROY, D. (1997) *Peut-on interrompre le processus d'oxydation de la pyrite par injection?* Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 18 p.
- TASA, A., VUORINEN, A., GARCIA, O., TUOVINEN, O.H. (1997) *Biologically Enhanced Dissolution of a Pyrite-Rich Black Shale Concentrate*, Journal of Environmental Science and Health, Part A, vol. 32, no. 9-10, p. 2683-2695.
- WHITEHURST, E.A. (février 1951) *Soniscopes tests concrete structures*, J. Amer. Concr. Inst., no. 47, p.433-444.

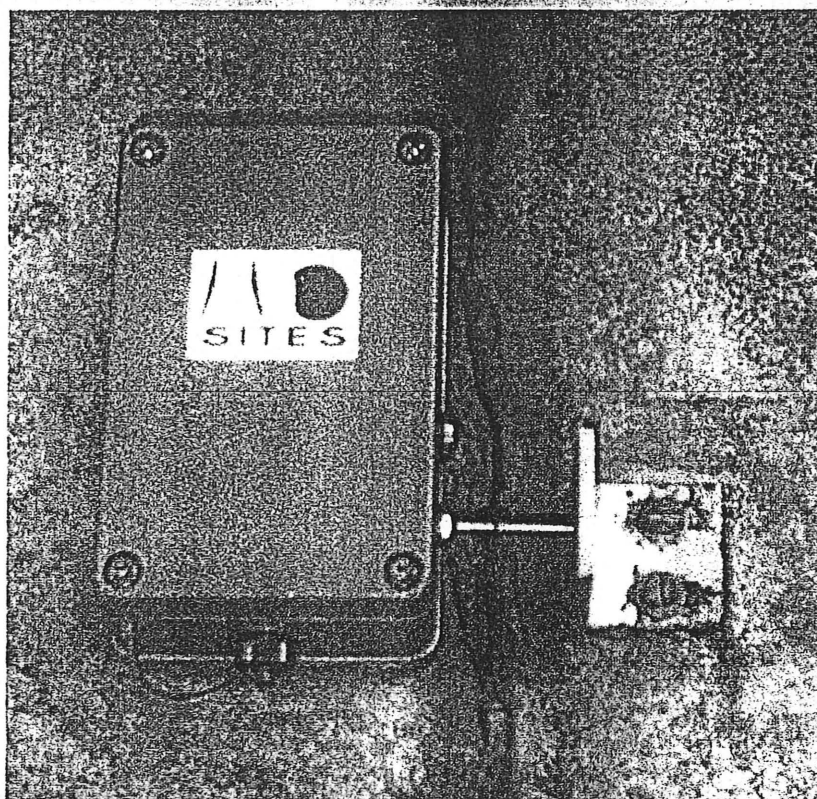
WILKIN, R.T., BARNES, H.L. (1997) *Formation Processes of Framboidal Pyrite*, Geochimica et Cosmochimica, vol. 61, no. 2, p. 323-339.

### **Annexe 1 : Fiche technique des fissuromètres**

- Fissuro-Logger
- Tell-Tale

# FISSURO-LOGGER®

**POUR MESURER ET ENREGISTRER EN CONTINU  
L'OUVERTURE DE FISSURES OU DE JOINTS ET LA TEMPÉRATURE**



Echelle approchée de la vue : 1/2

Le FISSURO-LOGGER® est un capteur enregistreur autonome, destiné à la surveillance simultanée des variations d'ouverture d'une fissure (ou du déplacement relatif entre deux parties d'ouvrage) et de la température ambiante.

La grande résolution de son capteur, associée à un enregistreur en continu autonome et son alimentation sur pile lithium, font du FISSURO-LOGGER®, un instrument complet, de mise en oeuvre simple, capable de résoudre de nombreux problèmes typiques de surveillance sur tous types d'ouvrages, structures et bâtiments.

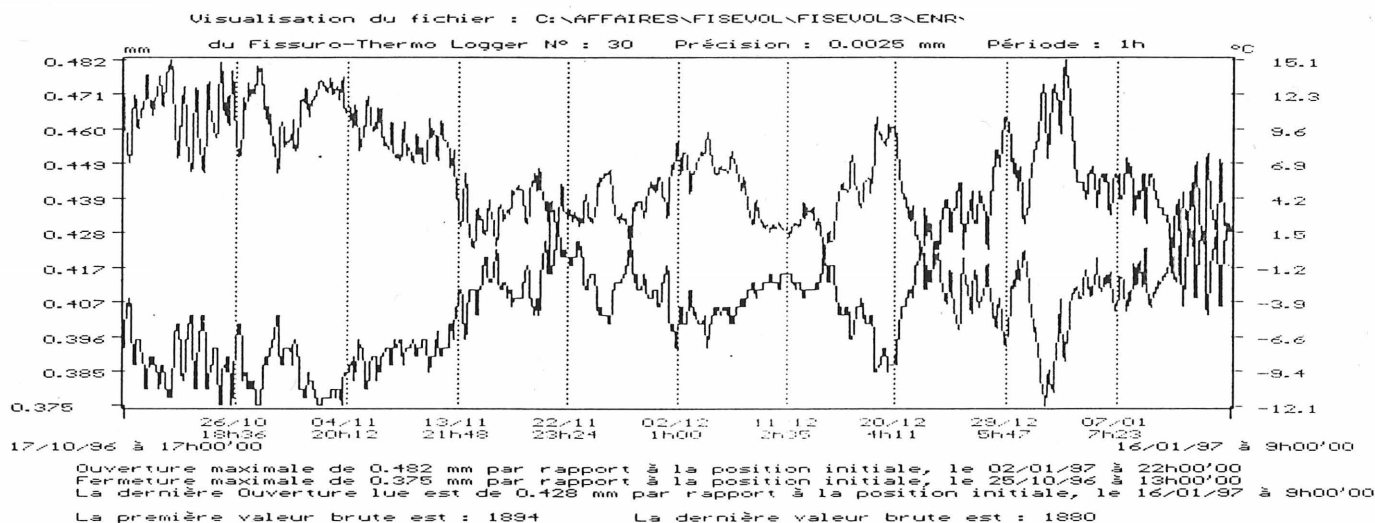


# FISSURO-LOGGER®

Le boîtier comprend un capteur de déplacements de type résistif, un circuit électronique de conditionnement et une EEPROM de stockage des données pilotée par un microcontrôleur. Une sonde de température est intégrée au boîtier. La période d'acquisition des mesures de déplacement et de température est paramétrée par l'opérateur.

Le boîtier est fixé solidement à la structure. L'extrémité de la tige du capteur de déplacement qui sort du boîtier, est positionnée en butée sur une équerre solidaire de l'autre partie de la structure. Dès le lancement de l'appareil, celui-ci va mesurer et consigner les valeurs dans sa mémoire, de façon complètement autonome. A l'issue de la campagne d'étude du phénomène à surveiller (qui peut aller jusqu'à un an), l'utilisateur vient rapatrier les données stockées dans l'appareil, à partir d'un ordinateur portable.

Le logiciel FISEVOL, fourni avec l'appareil, permet de configurer l'appareil, lancer les acquisitions, transférer et éditer les données recueillies (compatibles tableur).



## Caractéristiques techniques :

### Capteur de déplacement

Capteur résistif avec rappel de la tige par ressort intégré.

- \* Etendue de mesure :  $\pm 5$  mm
- \* Résolution : 0,003 mm
- \* Précision : 0,01 mm sur toute la plage
- \* Etanchéité : IP 65

### Sonde de température

- \* Gamme de température :  $-25^{\circ}\text{C}$  à  $+65^{\circ}\text{C}$
- \* Résolution :  $0,4^{\circ}\text{C}$

### Unité de mesure et mémoire

- Conversion A/N : 12 bits
- Stockage : EEPROM
- Capacité : 8100 mesures (16200 en option)
- Période d'acquisition configurable : 0,5 s à 1 heure
- Durée : 1 heure à 365 jours
- Alimentation : pile lithium 1/2 AA 3,6V
- Autonomie : supérieure à un an
- Logiciel FISEVOL pour DOS ou WINDOWS 95

### Coffret

- Boîtier aluminium
- Etanchéité : IP 65
- Dimensions (L x l x H) : 64 x 98 x 36 mm
- Température de stockage :  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+85^{\circ}\text{C}$
- Température d'utilisation :  $-25^{\circ}\text{C}$  à  $+65^{\circ}\text{C}$
- Poids : 300 g

### Accessoires

- Contreplaque pour fixation boîtier
- Equerre
- Cordon pour configuration et rapatriement des données

D'autres types de capteurs peuvent être intégrés au fissuro-logger; capteurs de déplacement avec courses plus longues (75 mm, 100 mm...), capteurs inclinométriques, météorologiques... Nous consulter.

SITES SE RESERVE LE DROIT DE MODIFIER LES CARACTERISTIQUES DE SES PRODUITS SANS PREAVIS

fiche 12-11-3-3

## AGENCE PARIS / SIEGE

2 bis, avenue du Centre  
92500 RUEIL MALMAISON  
Tél (33) 01 41 39 02 00  
Fax (33) 01 41 39 02 01



## AGENCE LYON

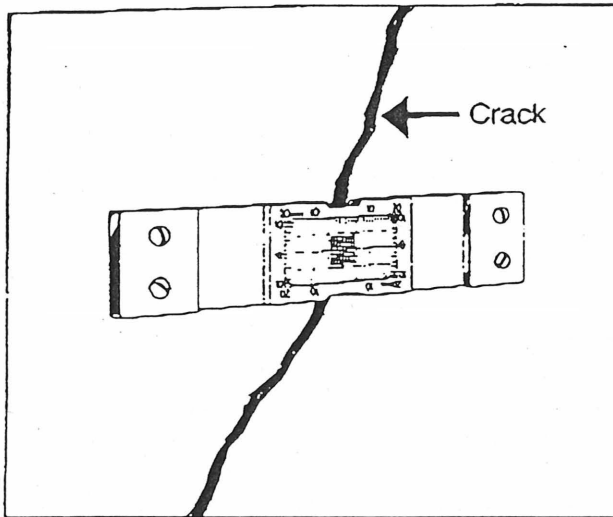
6, chemin des Muguets  
69130 ECULLY  
Tél (33) 04 78 33 80 00  
Fax (33) 04 78 33 44 18



## CRACK MONITORING

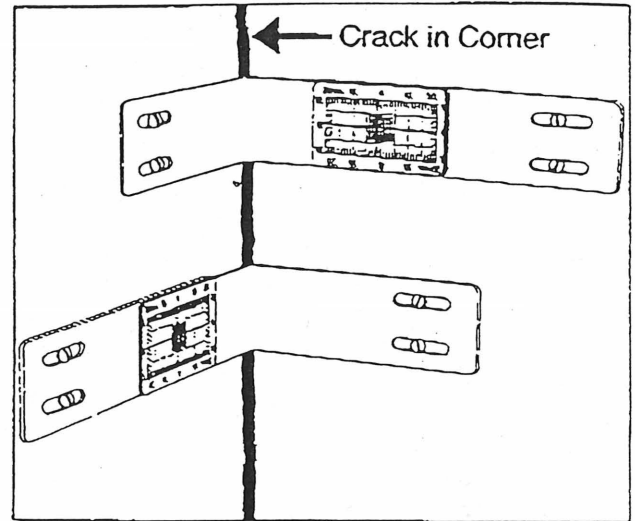
Avongard Tell-Tales consist of two plates which overlap for part of their length. The bottom plate is calibrated in millimetres and the overlapping plate is transparent and marked with a hairline cursor.

All Tell-Tales are manufactured with four pre-formed holes for screw/plug fixing. The Tell-Tales are fixed perpendicular to the crack. As the crack opens or closes so one plate moves relative to the other. The relationship of the cursor to the calibration represents the amount of movement occurring.



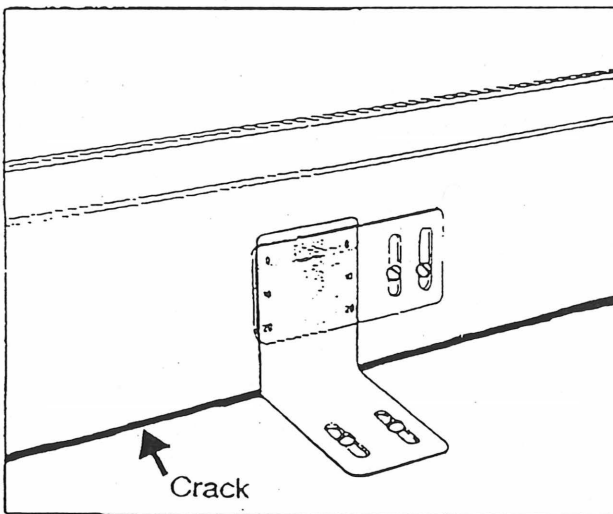
### STANDARD TELL-TALE

Produced in durable acrylic plastic.  
Monitors horizontal and vertical movements across cracks.



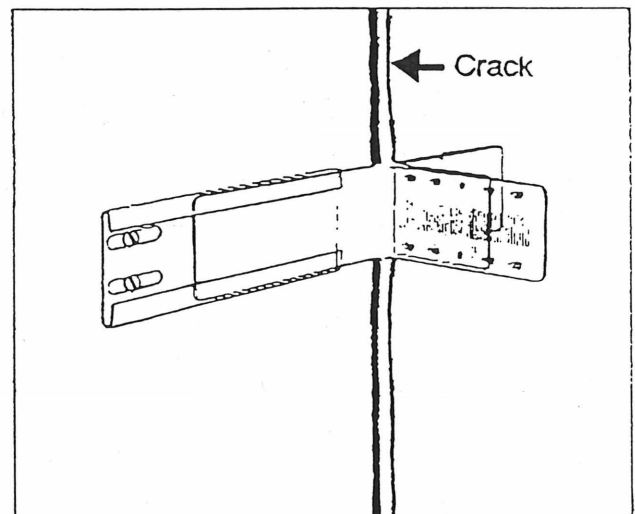
### CORNER TELL-TALE

Produced in durable PVC rigid sheet.  
Monitors horizontal and vertical movements across cracks in corners.



### FLOOR TELL-TALE

Produced in durable PVC rigid sheet.  
Monitors settlement of floors relative to a wall or column.



### DISPLACEMENT TELL-TALE

Produced in durable PVC rigid sheet.  
Monitors movement across a crack when one surface moves out of plane to the other.



Il n'y a pas de pages 153 et 154 dans la version papier

**Annexe 2 : Protocole de recherche  
sur bâtiments résidentiels existants**  
Nouvelle adaptation

Il n'y a pas de page 156 dans la version papier

PROTOCOLE DE RECHERCHE  
SUR BÂTIMENTS  
RÉSIDENTIELS EXISTANTS

RAPPORT TYPE #

BÂTIMENT RÉSIDENTIEL

Ville	
-------	--

Auteur du levé : \_\_\_\_\_  
Contact fait par : \_\_\_\_\_  
Date du levé : \_\_\_\_\_  
Photos # : \_\_\_\_\_  
Dossier ACQC # : \_\_\_\_\_  
Dossier Lab # : \_\_\_\_\_

NOUVELLE ADAPTATION DU PROTOCOLE CTQ-M200 DU  
COMITÉ TECHNIQUE QUÉBÉCOIS D'ÉTUDE DES PROBLÈMES DE GONFLEMENT  
ASSOCIÉS À LA PYRITE

## **1.0 IDENTIFICATION DE LA PROPRIÉTÉ**

Propriétaire actuel	:		
Adresse civique	:		
Ville	:		
Téléphone	:		
Type de bâtiment	:	<input type="checkbox"/> Cottage	<input type="checkbox"/> Tadoussac
		<input type="checkbox"/> Bungalow	<input type="checkbox"/> Autre : _____
Année de construction	:		
De la maison	:		
Du garage	:		
Année d'acquisition	:		
Nombre de propriétaire ayant possédé la maison:	:		
Évaluation municipale	:		
Terrain	:		
Bâtiments:	:		
Année de l'évaluation	:		
Agent et/ou courtier	:		
Contracteur	:		
Autres informations	:		

## **2.0 RELEVÉ VISUEL DES DÉSORDRES**

### *Notes:*

- Le relevé des désordres indique uniquement les défauts relevés sur les éléments visuellement observables pouvant être affectés par un gonflement associé à la présence de pyrite dans le remblai.
- Le relevé peut avoir une portée limitée si plusieurs de ces éléments structuraux ne peuvent être observés à cause de la présence d'obstacles visuels, comme des faux planchers ou des tapis, par exemple.

## 2.1 Relevé des désordres au sous-sol

<b>Dimensions du sous-sol (m x m) :</b>	
<b>Dimension de la partie visible de béton (m x m) :</b>	
<b>Type de revêtement :</b> <input type="checkbox"/> (→ nombre de pièces) <input type="checkbox"/> Aucun revêtement	<b>Faux plancher recouvert de :</b> <input type="checkbox"/> bois <input type="checkbox"/> tapis <input type="checkbox"/> prélard <input type="checkbox"/> autre : _____
<b>Céramique</b> <input type="checkbox"/> Tapis sur béton <input type="checkbox"/> Prélard sur béton <input type="checkbox"/> Peinture <input type="checkbox"/> Autre : _____	

<b>Nombre de fissures dans la dalle du sous-sol</b> <input type="checkbox"/> plusieurs fissures longitudinales <input type="checkbox"/> une ou deux fissures longitudinales <input type="checkbox"/> plusieurs fissures en étoile <input type="checkbox"/> une ou deux fissures en étoile <input type="checkbox"/> microfissures <input type="checkbox"/> fissures ramifiées <input type="checkbox"/> fissures polygonales <input type="checkbox"/> fissure en quart de cercle (coin) <input type="checkbox"/> aucune fissure  <b>Colmatage des fissures de la dalle</b> Fissures colmatées : <input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non Fissures colmatées et refissurées : <input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non Matériau de colmatage : <input type="checkbox"/> flexible <input type="checkbox"/> rigide  <b>Ouverture des fissures</b> Ouverture minimum : _____ mm (fissure fermée si microfissure) Ouverture maximale : _____ mm Ouverture moyenne : _____ mm  <b>Décalage des lèvres des fissures</b> Maximum : _____ Combien : _____ fissure(s) Moyen : _____ Combien : _____ fissure(s)	<b>Sulfatation</b> Dalle de béton : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non Mur de fondation côté intérieur : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non Où : _____ Mur de fondation côté extérieur : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non Où : _____ (mur avant, arrière, côté extérieur ou intérieur)  <b>Murs de fondation (section sous-sol)</b> <input type="checkbox"/> présence de fissures aux coins: # _____ <input type="checkbox"/> verticale <input type="checkbox"/> en cône Ouverture : _____ mm/m Déplacement : _____ mm/m Lézardes associées à la fissure : # _____  <input type="checkbox"/> présence de fissures entre les coins: # _____ <input type="checkbox"/> verticale <input type="checkbox"/> diagonale Ouverture : _____ mm/m Déplacement : _____ mm/m Lézardes associées à la fissure : # _____  <input type="checkbox"/> présence de fissures aux coins des fenêtres : # _____ Ouverture : _____ mm/m Déplacement : _____ mm/m  <input type="checkbox"/> aucune fissure dans la fondation  <b>Colmatage des fissures du mur de fondation</b> Fissures colmatées : <input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non Fissures colmatées et refissurées : <input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non Matériau de colmatage : <input type="checkbox"/> flexible <input type="checkbox"/> rigide
--	---

<p><b>Origine(s) possible de la fissuration</b></p> <p><input type="checkbox"/> gonflement du remblai</p> <p><input type="checkbox"/> retrait du béton</p> <p><input type="checkbox"/> tassement / affaissement</p> <p><input type="checkbox"/> gel / dégel</p> <p><input type="checkbox"/> mauvais compactage</p> <p><b>Présence de poudre blanchâtre</b></p> <p><input type="checkbox"/> associé aux fissures      Quantité: ① ② ③</p> <p><input type="checkbox"/> joint dalle-mur      Quantité: ① ② ③</p> <p><input type="checkbox"/> autres endroits: _____</p> <p>(sous le calorifère, sous une porte, autour d'objets, autour du chauffe-eau, au milieu de la dalle, sous un tapis...)</p> <p>Type de cristaux/minéraux : _____</p> <p><b>Amplitude des soulèvements perceptibles</b></p> <p>Maximum : _____ mm/m    Moyen : _____ mm/m</p> <p><input type="checkbox"/> aucun soulèvement perceptible</p> <p>Nombre de bosses : _____</p> <p><input type="checkbox"/> soulèvement à travers le revêtement</p> <p>Nombre de bosse : _____ Max : _____ mm/m</p> <p>Type de revêtement : _____</p> <p>Bosse(s) nivelée(s) : <input type="checkbox"/> oui   <input type="checkbox"/> non   # : _____</p>	<p><b>Cloisons du sous-sol</b></p> <p><input type="checkbox"/> fissurées</p> <p><input type="checkbox"/> flambage</p> <p><input type="checkbox"/> aucun dommage</p> <p><input type="checkbox"/> pas de cloison</p> <p><b>Portes au sous-sol</b></p> <p><input type="checkbox"/> ferment mal</p> <p><input type="checkbox"/> aucun dommage</p> <p><input type="checkbox"/> pas de porte</p> <p><b>Dommmages à l'étage</b></p> <p><input type="checkbox"/> oui (faire croquis de l'étage)      <input type="checkbox"/> non</p> <p><input type="checkbox"/> soulèvement du plancher à l'étage: _____ mm/m</p> <p><input type="checkbox"/> cloisons avec dommages: _____</p> <p><input type="checkbox"/> aucun dommage à l'étage</p> <p><input type="checkbox"/> autre dommage</p> <p><b>Gouttière extérieure</b></p> <p><input type="checkbox"/> absente</p> <p><input type="checkbox"/> s'égoutte près de la fondation : # _____</p> <p><input type="checkbox"/> s'égoutte loin de la fondation : # _____</p> <p>Type de gouttière :</p> <p><input type="checkbox"/> bout droit      <input type="checkbox"/> pierre nette</p> <p><input type="checkbox"/> déroule vert      <input type="checkbox"/> drain français</p> <p><input type="checkbox"/> autre : _____</p> <p><input type="checkbox"/> absente</p>
<p><b>#1 Type de problème :</b></p> <p><input type="checkbox"/> Gonflement du remblai</p> <p><input type="checkbox"/> Sulfatation de la dalle de béton</p> <p><input type="checkbox"/> Gonflement du remblai et sulfatation de la dalle</p>	<p><b>#2 Niveau de confiance :</b></p> <p><input type="checkbox"/> Très probable</p> <p><input type="checkbox"/> Peut-être</p> <p><input type="checkbox"/> Peu probable</p>
<p><b>#3 Problème d'ordre</b></p> <p><input type="checkbox"/> Esthétique</p> <p><input type="checkbox"/> Structural</p>	<p><b>#4 Phénomène(s) associé(s) :</b></p> <p><input type="checkbox"/> Tassement (mauvaise compaction)</p> <p><input type="checkbox"/> Assèchement du sol</p> <p><input type="checkbox"/> Gel/dégel</p> <p><input type="checkbox"/> Mauvaise construction</p> <p><input type="checkbox"/> Autre : _____</p>
<p><b>Remarques :</b></p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	

\* Pour la quantité, les codes correspondent aux qualificatifs suivants ① rare ② intermédiaire ③ abondante

## 2.3 Relevé des désordres au garage

Dimensions du garage (m x m) :	
Dimension de la partie visible de béton (m x m) :	
Type de revêtement : <input type="checkbox"/> Peinture <input type="checkbox"/> Autre : _____ <input type="checkbox"/> Aucun revêtement	Elévation du garage : <input type="checkbox"/> au niveau de la rue <input type="checkbox"/> au niveau du sous-sol <input type="checkbox"/> au niveau du rez-de-chaussée <input type="checkbox"/> autre : _____
<p><u>Nombre de fissures dans la dalle du garage</u></p> <input type="checkbox"/> plusieurs fissures longitudinales <input type="checkbox"/> une ou deux fissures longitudinales <input type="checkbox"/> plusieurs fissures en étoile <input type="checkbox"/> une ou deux fissures en étoile <input type="checkbox"/> microfissures <input type="checkbox"/> fissures ramifiées <input type="checkbox"/> fissures polygonales <input type="checkbox"/> fissure en quart de cercle (coin) <input type="checkbox"/> aucune fissure	<p><u>Sulfatation</u></p> Dalle de béton : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non Mur de fondation côté intérieur : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non Où : _____ Mur de fondation côté extérieur : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non Où : _____ (mur avant, arrière, côté extérieur ou intérieur)
<p><u>Colmatage des fissures de la dalle</u></p> Fissures colmatées : <input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non Fissures colmatées et refissurées : <input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non Matériau de colmatage : <input type="checkbox"/> flexible <input type="checkbox"/> rigide	<p><u>Murs de fondation (section garage)</u></p> <input type="checkbox"/> présence de fissures aux coins: # _____ <input type="checkbox"/> verticale <input type="checkbox"/> en cône Ouverture : ____ mm/m Déplacement : ____ mm/m Lézardes associées à la fissure : # _____
<p><u>Ouverture des fissures</u></p> Ouverture minimum : ____ mm (fissure fermée si microfissure) Ouverture maximale : ____ mm Ouverture moyenne : ____ mm	<input type="checkbox"/> présence de fissures entre les coins: # _____ <input type="checkbox"/> verticale <input type="checkbox"/> diagonale Ouverture : ____ mm/m Déplacement : ____ mm/m Lézardes associées à la fissure : # _____
<p><u>Décalage des lèvres des fissures</u></p> Maximum : ____ Combien : ____ fissure(s) Moyen : ____ Combien : ____ fissure(s)	<input type="checkbox"/> Aucune fissure dans la fondation <input type="checkbox"/> Lézardes aux coins de la porte de garage : # _____
<p><u>Présence de poudre blanchâtre</u></p> <input type="checkbox"/> associé aux fissures Quantité: ① ② ③ <input type="checkbox"/> joint dalle-mur Quantité: ① ② ③ <input type="checkbox"/> autres endroits: _____ (sous le calorifère, sous une porte, autour d'objets, au milieu de la dalle...) Type de cristaux/minéraux : _____	<p><u>Colmatage des fissures du mur de fondation</u></p> Fissures colmatées : <input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non Fissures colmatées et refissurées : <input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non Matériau de colmatage : <input type="checkbox"/> flexible <input type="checkbox"/> rigide
	<p><u>Pièces attenantes au garage</u></p> <input type="checkbox"/> oui: <input type="checkbox"/> dommages: <input type="checkbox"/> aucun dommage <input type="checkbox"/> pas de pièce attenante



<p><b><u>Amplitude des soulèvements perceptibles</u></b>  Maximum : _____ mm/m    Moyen : _____ mm/m  <input type="checkbox"/> aucun soulèvement perceptible  Nombre de bosses : _____    Bosse(s) nivelée(s) : <input type="checkbox"/> oui # : _____ <input type="checkbox"/> non    <b><u>Présence d'une dalle d'entrée</u></b>  <input type="checkbox"/> oui # fissures : _____ <input type="checkbox"/> non    <b><u>Gouttière extérieure</u></b>  <input type="checkbox"/> absente  <input type="checkbox"/> s'égoutte près de la fondation : # _____  <input type="checkbox"/> s'égoutte loin de la fondation : # _____  Type de gouttière :  <input type="checkbox"/> bout droit                      <input type="checkbox"/> pierre nette  <input type="checkbox"/> déroule vert                      <input type="checkbox"/> drain français  <input type="checkbox"/> autre : _____  <input type="checkbox"/> absente    <b><u>Puisard</u></b>  Niveau d'eau p/r à la surface : _____ mm  Matériau : _____</p>	<p><b><u>Lavage de voitures dans le garage</u></b>  <input type="checkbox"/> fréquent  <input type="checkbox"/> parfois  <input type="checkbox"/> rare  <input type="checkbox"/> jamais    <b><u>Température moyenne en hiver du garage</u></b>  _____ °C  <input type="checkbox"/> garage non chauffé    <b><u>Porte de garage</u></b>                      <b><u>Type de garage</u></b>  <input type="checkbox"/> se ferme bien                      <input type="checkbox"/> simple  <input type="checkbox"/> se ferme mal                      <input type="checkbox"/> double  <input type="checkbox"/> ne se ferme plus    <b><u>Puisard</u></b>  Matériau de confection : _____  Présence d'eau : <input type="checkbox"/> oui                      <input type="checkbox"/> non  Niveau de l'eau p/r à la surface de la dalle : _____ mm    <b><u>État du pilier central du garage double</u></b>  <input type="checkbox"/> fissuré  <input type="checkbox"/> non fissuré</p>
<p><b><u>#1 Type de problème :</u></b>  <input type="checkbox"/> Gonflement du remblai  <input type="checkbox"/> Sulfatation de la dalle de béton  <input type="checkbox"/> Gonflement du remblai et sulfatation de la dalle</p>	<p><b><u>#2 Niveau de confiance :</u></b>  <input type="checkbox"/> Très probable  <input type="checkbox"/> Peut-être  <input type="checkbox"/> Peu probable</p>
<p><b><u>#3 Problème d'ordre</u></b>  <input type="checkbox"/> Esthétique  <input type="checkbox"/> Structural</p>	<p><b><u>#4 Phénomène(s) associé(s) :</u></b>  <input type="checkbox"/> Tassement (mauvaise compaction)  <input type="checkbox"/> Assèchement du sol  <input type="checkbox"/> Gel/dégel  <input type="checkbox"/> Mauvaise construction  <input type="checkbox"/> Autre : _____</p>
<p><b>Remarques :</b></p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	

\* Pour la quantité, les codes correspondent aux qualificatifs suivants ① rare ② intermédiaire ③ abondante

## 2.4 Terrain

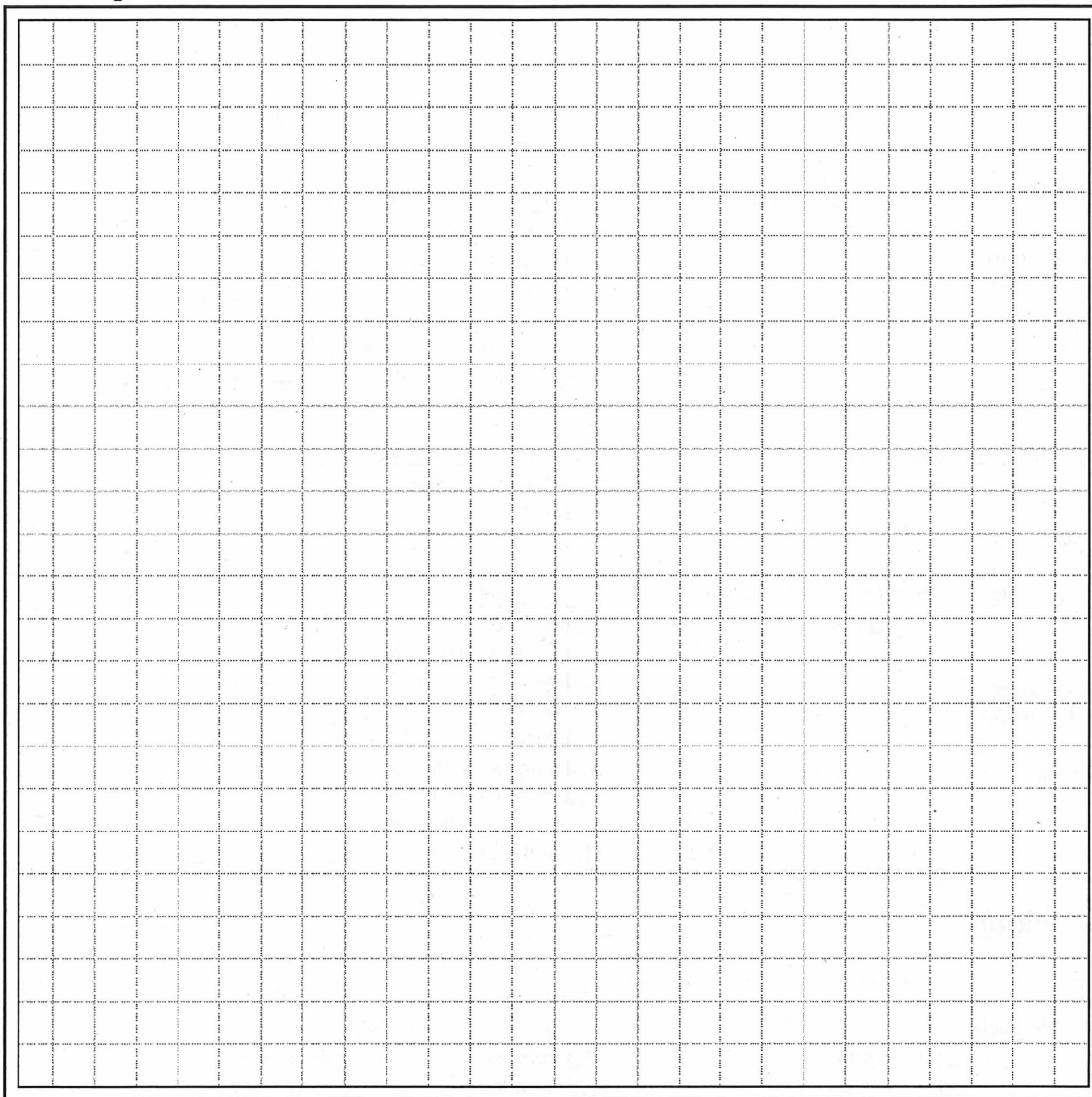
<p><b>Dénivelé du terrain à l'avant de la maison</b></p> <p><input type="checkbox"/> plat</p> <p><input type="checkbox"/> incliné vers la rue</p> <p><input type="checkbox"/> incliné vers la maison</p> <p><input type="checkbox"/> surélevé</p> <p><input type="checkbox"/> surbaissé</p> <p><input type="checkbox"/> autre : _____</p> <p><b>Dénivelé du terrain à l'arrière de la maison</b></p> <p><input type="checkbox"/> plat</p> <p><input type="checkbox"/> incliné vers l'arrière</p> <p><input type="checkbox"/> incliné vers la maison</p> <p><input type="checkbox"/> surélevé</p> <p><input type="checkbox"/> surbaissé</p> <p><input type="checkbox"/> autre : _____</p> <p><b>Terrain autour de la fondation (1 mètre)</b></p> <p><input type="checkbox"/> abaissé</p> <p><input type="checkbox"/> élevé</p> <p><input type="checkbox"/> au niveau</p> <p><b>Terrain(s) voisin(s) s'égoutte(nt) vers la maison</b></p> <p><input type="checkbox"/> oui # : _____ <input type="checkbox"/> non</p> <p><b>Maison vs quartier</b></p> <p><input type="checkbox"/> en bas d'une côte</p> <p><input type="checkbox"/> en haut d'une côte</p> <p><input type="checkbox"/> quartier plat</p>	<p><b>Piscine</b></p> <p><input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non</p> <p><input type="checkbox"/> creusée <input type="checkbox"/> hors-terre</p> <p><b>Problème de niveau d'eau :</b></p> <p><input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non</p> <p><b>Problème de pompe :</b> <input type="checkbox"/> oui Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> non</p> <p>Où est la pompe : _____</p> <p><b>Arbre près de la fondation</b></p> <p><input type="checkbox"/> oui (voir croquis) <input type="checkbox"/> non</p> <p><input type="checkbox"/> conifère Type : _____</p> <p><input type="checkbox"/> feuillu Type : _____</p> <p><b>Plate-bande autour des fondation</b></p> <p><input type="checkbox"/> oui (voir croquis) <input type="checkbox"/> non</p> <p>Utilise des engrais : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non</p> <p><b>Utilise des engrais pour la pelouse</b></p> <p><input type="checkbox"/> oui Type : _____</p> <p><input type="checkbox"/> non</p> <p><b>Environnement</b></p> <p><input type="checkbox"/> rivière à proximité</p> <p><input type="checkbox"/> fossé à proximité</p> <p><input type="checkbox"/> boisé à proximité</p> <p><input type="checkbox"/> terrain vague</p> <p><input type="checkbox"/> parc</p> <p><input type="checkbox"/> station service</p> <p><input type="checkbox"/> pylône électrique</p> <p><input type="checkbox"/> centre commerciaux</p> <p><input type="checkbox"/> autre : _____</p>
--	--

## 2.5 Historique

<p><b>Sous-sol</b></p> <p><b>Événement déclencheur</b></p> <p><input type="checkbox"/> verglas <input type="checkbox"/> dynamitage</p> <p><input type="checkbox"/> inondation <input type="checkbox"/> sécheresse</p> <p><input type="checkbox"/> dégât d'eau <input type="checkbox"/> autre : _____</p> <p><b>Année d'apparition des fissures :</b> _____</p> <p><b>Évolution de la fissuration :</b> _____</p> <p><b>Évolution du gonflement :</b> _____</p>	<p><b>Garage</b></p> <p><b>Événement déclencheur</b></p> <p><input type="checkbox"/> verglas <input type="checkbox"/> dynamitage</p> <p><input type="checkbox"/> inondation <input type="checkbox"/> sécheresse</p> <p><input type="checkbox"/> dégât d'eau <input type="checkbox"/> autre : _____</p> <p><b>Année d'apparition des fissures :</b> _____</p> <p><b>Évolution de la fissuration :</b> _____</p> <p><b>Évolution du gonflement :</b> _____</p>
--	--

## 2.4 Croquis des désordres (sous-sol et garage)

*vue en plan*



### LÉGENDE

- |       |                      |   |  |
|-------|----------------------|---|--|
| =     | mur de fondation     | ⊠ | secteur non visible (tapis, faux plancher, etc.) |
| —     | cloison non portante | ⊗ | sondage  |
| -●-●  | cloison portante     | → | mouvement latéral probable perceptible           |
| - - - | fissure              | + | mouvement vertical probable perceptible          |